



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Degradación Anaerobia de Residuos de
Restaurantes de Ciudad Universitaria**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO**

PRESENTA

NADIA HUERTA GALLEGOS

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ



Ciudad Universitaria, México D. F.

2010



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 Profesor: Ing. Jacinto Viqueira Landa

Vocal Profesora: Dra. Alejandra Castro González

Secretario Profesor: Dr. Arturo G. Reinking Cejudo

1er. Suplente Profesora: Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez

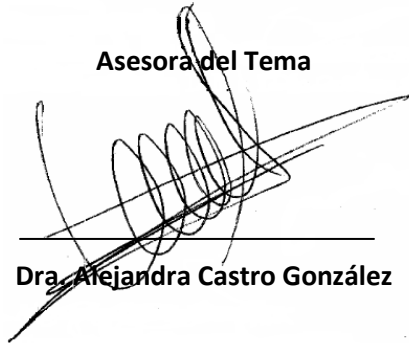
2do. Suplente Profesora: M. en I. Tanya Moreno Coronado

Sitio donde se desarrolló el tema:

División de Ingeniería Eléctrica

Facultad de Ingeniería Ciudad Universitaria, UNAM.

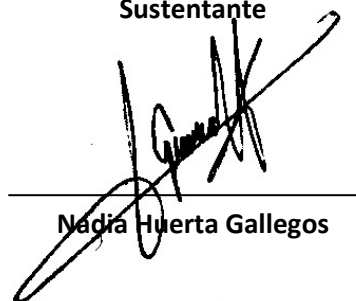
Asesora del Tema



A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke, positioned above a horizontal line.

Dra. Alejandra Castro González

Sustentante



A handwritten signature in black ink, featuring a large loop and a long horizontal stroke, positioned above a horizontal line.

Nadia Huerta Gallegos

DEDICATORIA

Dedicada a mis padres, hermanas y sobrina.

María del Rosario Gallegos Santana

Gumersindo Huerta Bautista

Perla Rebeca Huerta Gallegos

Michelle Adriana Huerta Gallegos

Sabbath Nerea Ramírez Huerta

Quienes me han apoyado incondicionalmente y me han hecho muy feliz y dado mucho amor toda mi vida.

No cabe duda que lo más importante en mi vida es mi Familia.

Los amo mucho.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por haberme permitido llegar a esta etapa de mi vida, con salud, amor y felicidad.

Gracias Mamá por darme la vida, por apoyarme incondicionalmente, por aconsejarme, por siempre creer en mi, por ser mi mejor y única gran amiga, por hacerme tan feliz y darme tanto amor, por compartir tu sabiduría e inteligencia, por enseñarme a vivir la vida, por haberme ayudado a lo largo de toda mi etapa de estudiante y por haber contribuido en la realización de los experimentos que hicieron posible mi tesis. Gracias por todo Ma.

Gracias Papá por tu apoyo incondicional, por enseñarme a ser fuerte y perseverante por compartir tu sabiduría e inteligencia, por haberme apoyado a lo largo de toda mi vida de estudiante, por ayudarme con tu ingenio en el experimento que hizo posible mi tesis y por hacerme tan feliz, darme tanto amor y creer en mi Gracias por todo Pa.

Gracias Perla y Michelle por sus consejos, por su apoyo, por creer en mi y por hacerme tan feliz y darme tanto amor.

Gracias Dra. Alejandra por su amistad, por todo el apoyo y tiempo que dedicó para que mi tesis llegara a su fin, por creer en mi y por ser tan positiva, alentadora y por ser una excelente profesora.

Gracias a mis sinodales que me ayudaron a finalizar de manera exitosa mi tesis y por haberme apoyado cuando yo me encontraba lejos.

Gracias a José Ramón Fonseca Velázquez por darme tanto amor y felicidad, por apoyarme y por haberme ayudado tanto en la conclusión de mi titulación. Gracias por todo Joge.

Gracias a la Familia Fonseca Velázquez por su apoyo y por el cariño y momentos buenos que me han dado.

Gracias a toda mi familia por creer en mi.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
RESUMEN.....	X
GLOSARIO	XI
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN	4
2.1 BIOMASA	4
2.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LOS RESIDUOS URBANOS DE TIPO ORGÁNICO (RUO).....	6
2.1.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS.....	6
2.1.1.1.1 PESO ESPECÍFICO	6
2.1.1.1.2 CONTENIDO DE HUMEDAD.....	7
2.1.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS.....	8
2.1.1.2.1 ANÁLISIS FÍSICO	8
2.1.1.2.2 PUNTO DE FUSIÓN DE LAS CENIZAS	8
2.1.1.2.3 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS COMPONENTES DE LOS RUO	9
2.1.1.2.4 CONTENIDO ENERGÉTICO DE LOS COMPONENTES DE LOS RUO	10
2.1.1.2.5 NUTRIENTES ESENCIALES Y OTROS ELEMENTOS	13
2.1.1.3 PROPIEDADES BIOLÓGICAS.....	13
2.1.1.3.1 BIODEGRADABILIDAD DE LOS COMPONENTES DE RESIDUOS ORGÁNICOS	14
2.1.1.3.2 PRODUCCIÓN DE OLORES.....	16
2.2 TECNOLOGÍAS PARA LA CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA	16
2.2.1 PROCESOS TERMOQUÍMICOS.....	18
2.2.1.1 COMBUSTIÓN	18
2.2.1.2 GASIFICACIÓN	19
2.2.1.3 PIRÓLISIS	20
2.2.2 PROCESOS BIOQUÍMICOS	22

2.2.2.1 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	23
2.2.2.2 DIGESTIÓN	25
2.2.2.3 COMPOST.....	26
2.2.2.3.1 FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE	26
2.2.2.3.2 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL PROCESO DE COMPOSTAJE	29
2.2.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN QUÍMICA DIRECTA	31
2.2.4 TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES	31
2.2.4.1 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS	31
2.2.4.2 BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS	32
2.2.4.3 BIOCOMBUSTIBLES GASEOSOS.....	33
2.3 DIGESTIÓN	34
2.3.1 DISEÑO DE UN DIGESTOR	36
2.3.1.1 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)	36
2.3.1.2 TAMAÑO DEL DIGESTOR Y DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS	37
2.3.1.3 SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO	39
2.3.2 TIPOS DE DIGESTORES	41
2.3.2.1 DIGESTORES DE UNA ETAPA.....	41
2.3.2.2 DIGESTORES DE DOS ETAPAS.....	42
2.3.2.3 DIGESTORES DE DOS FASES	42
2.3.2.4 DIGESTORES DE CONTACTO ANAEROBIO	43
2.3.2.5 DIGESTORES DE PELÍCULA ADHERIDA O FILTRO ANAEROBIO	43
2.3.2.6 DIGESTORES DE FLUJO PISTÓN.....	43
2.3.2.7 DIGESTOR DE LECHO DE LODO	44
2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS DIGESTORES SEGÚN EL TIPO DE ALIMENTACIÓN	44
2.3.3.1 DIGESTOR DE LLENADO INTERMITENTE	44
2.3.3.2 DIGESTOR DE LLENADO CONTINUO	45
2.3.4 FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN.....	45
2.3.4.1 PROPORCIÓN DE CARBONO-NITRÓGENO	46
2.3.4.2 TEMPERATURA.....	46
2.3.4.3 ACIDEZ Y ALCALINIDAD	46
2.3.4.4 RELACIÓN PROPORCIONAL DE SÓLIDOS A LÍQUIDOS.....	47
2.3.4.5 PREPARACIÓN Y MEZCLA DE LOS MATERIALES	48

2.3.4.6 AGITACIÓN Y MEZCLADO.....	48
2.3.4.7 TIEMPO DE RETENCIÓN	48
2.3.5 DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN BAJA CONCENTRACIÓN	49
2.3.5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	49
2.3.5.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL PROCESO	50
2.3.6 DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN ALTA CONCENTRACIÓN	50
2.3.6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	50
2.3.6.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL PROCESO	50
2.3.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN BAJAS Y ALTAS CONCENTRACIONES PARA LOS RUO.....	51
2.3.8 PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN.....	51
2.3.8.1 BIOGÁS.....	51
2.3.8.1.1 VALOR DE COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS.....	58
2.3.8.1.2 ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS.....	58
2.3.8.1.3 USO DEL BIOGÁS.....	59
2.3.8.1.4 TRATAMIENTO DEL BIOGÁS EN FUNCIÓN DE SU USO.....	59
2.3.8.1.4.1 ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS	60
2.3.8.1.4.2 DESHIDRATACIÓN CONDENSADORES	61
2.3.8.1.4.3 ELIMINACIÓN DE H ₂ S.....	61
2.3.8.1.4.3.1 BIOLÓGICA	61
2.3.8.1.4.3.2 BIOFILTROS O BIOSCRUBBER	62
2.3.8.1.4.3.3 POR ADICIÓN DE CLORURO DE HIERRO	62
2.3.8.1.4.3.4 ÓXIDO DE HIERRO	62
2.3.8.1.4.3.5 VIRUTAS DE MADERA CUBIERTAS DE ÓXIDO DE HIERRO	63
2.3.8.1.4.3.6 PELLETS IMPREGNADOS DE ÓXIDO FÉRRICO.....	63
2.3.8.1.4.3.7 FILTROS MOLECULARES	63
2.3.8.1.4.3.8 MÉTODOS EN MEDIO LÍQUIDO	64
2.3.8.1.4.4 MÉTODOS DE CONCENTRACIÓN DEL BIOGÁS Y ELIMINACIÓN DE CO ₂	64
2.3.8.2 LODO DIGERIDO.....	64
CAPÍTULO 3 CASO DE ESTUDIO	66

3.1 RESIDUOS ORGÁNICOS DE CIUDAD UNIVERSITARIA.....	66
3.1.1 MANEJO DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN CIUDAD UNIVERSITARIA.....	66
3.1.2 CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE CAFETERÍAS DE CIUDAD UNIVERSITARIA.....	67
3.2 CONDICIONES DE LA CAFETERÍA DE CASO DE ESTUDIO.....	70
3.3 GASTOS ENERGÉTICOS	72
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA	75
4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS DESECHOS	75
4.2 DISEÑO DEL REACTOR A NIVEL LABORATORIO	76
4.3 INÓCULO.....	78
4.4 ARRANQUE DEL DIGESTOR.....	79
4.5 PRESENCIA DE METANO EN EL BIOGÁS Y SU INFLAMABILIDAD	82
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	85
5.1 OPERACIÓN DEL REACTOR A FLUJO INTERMITENTE	85
5.1.1 PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL.....	85
5.1.2 SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL.....	91
5.2 RESUMEN DE RESULTADOS	96
5.3 ANÁLISIS DE DE RESULTADOS.....	96
CAPÍTULO 6 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA PROPUESTA	101
6.1 FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL RESTAURANTE CAFESÍN.....	101
6.1.1 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL REACTOR POR MÉTODO 1 A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES.	102
6.1.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS POR MÉTODO 1 (A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES).....	105
6.1.3 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS AL DÍA POR MÉTODO 1 (A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES)	105
6.1.4 CÁLCULO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LODOS DIGERIDOS POR MÉTODO 1. A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES	108
6.1.5 RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA OBTENIDOS POR EL MÉTODO 1 A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES	109
6.1.6 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR EL MÉTODO 2. A PARTIR DE PARÁMETROS TEÓRICOS.....	111
6.1.7 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS PARA DATOS DEL EXPERIMENTO 1 Y 2 DEL MÉTODO 2 A PARTIR DE PARÁMETROS TEÓRICOS	114

6.1.8 FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL CONJUNTO DE RESTAURANTES DE CU SELECCIONADOS	116
6.1.9 CÁLCULO DE LAS OPERACIONES UNITARIAS PARA EL TRATAMIENTO DE RUO DEL CAFESÍN	117
6.1.10 GAS LP AHORRADO ANUALMENTE POR LA CAFETERÍA CAFESÍN	121
6.2 FACTIBILIDAD AMBIENTAL	124
6.2.1. OTRAS VENTAJAS DE GENERAR ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA.	127
6.2.2 EMISIONES DE GEI EVITADAS POR LA CAFETERÍA CAFESÍN EN UN AÑO	128
6.2.3 EMISIONES DE GEI EVITADAS ANUALMENTE POR LA SUMA DE RUO GENERADOS EN LOS RESTAURANTES DE CU SELECCIONADOS.....	130
6.3 FACTIBILIDAD POLÍTICA	132
6.4 FACTIBILIDAD ECONÓMICA	137
6.4.1 VALOR PRESENTE NETO	137
6.4.1.1 CÁLCULO DEL VALOR PRESENTE NETO DEL PROYECTO PROPUESTO	138
6.4.2 TASA INTERNA DE RETORNO TIR	142
6.4.2.1 CÁLCULO DEL LA TIR DEL PROYECTO	143
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES	145
ANEXO 1	148
ANEXO 2	150
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Procesos de conversión de la biomasa, productos y aplicaciones.....	17
Figura 2. 2 Procesos de gasificación.....	20
Figura 2. 3 Esquema global del proceso de obtención del etanol.	25
Figura 2. 4 Proceso de compostaje.	26
Figura 2. 5 Fases del proceso de compostaje.....	28
Figura 2. 6 Gasómetro de baja presión.	58
Figura 2. 7 Gasómetro inchable	59
Figura 2. 8 Valoración del biogás.	60
Figura 2. 9 Tratamientos de depuración del biogás de acuerdo a su uso.....	60
Figura 3. 1 Plano de localización de cafeterías sometidas a cuantificación de RUO.....	68
Figura 3. 2 Cafeterías sometidas a medición.	69
Figura 3. 3 Residuos de cafeterías sometidas a medición.	70
Figura 3. 4 Ubicación de la cafetería Cafesín.	71
Figura 3. 5 Vista aérea de la cafetería Cafesín.	71
Figura 3. 6 Fotografía del área propuesta de instalación del digestor.....	73
Figura 3. 7 Plano de la cafetería Cafesín.	73
Figura 3. 8 Cocina de la cafetería Cafesín	74
Figura 4. 1 Muestra de los residuos generados en el Cafesín.....	75
Figura 4. 2 Fotografía del reactor a nivel laboratorio utilizado como digestor.	77
Figura 4. 3 Bolsa aislante para el reactor.	77
Figura 4. 4 Recipiente recolector de biogás.....	78
Figura 4. 5 Válvula de de quema para el biogás.....	78
Figura 4. 6 Residuos preparados para la carga al digestor.....	79
Figura 4. 7 Digestor con carga completa en el arranque.	81
Figura 4. 8 Cubierta aislante del digestor.....	81
Figura 4. 9 Arreglo del reactor con cubierta aislante y almacenador del biogás.....	82
Figura 4. 10 Contenido de metano en el biogás y su inflamabilidad	84
Figura 5. 1 Registro de temperatura en la operación del digestor experimental.....	85
Figura 5. 2 Relación de la temperatura con la producción de biogás.	86
Figura 5. 3 Relación de pH con la temperatura de operación.....	87
Figura 5. 4 Relación del pH con la producción de biogás.....	87
Figura 5. 5 Pruebas de inflamabilidad y la producción de biogás.....	88
Figura 5. 6 Combustión del biogás generado.....	88
Figura 5. 7 Producción de biogás acumulado en la operación del digestor experimental.	89
Figura 5. 8 Características del lodo digerido.	90
Figura 5. 9 Registro de la temperatura de operación en la etapa a flujo intermitente.	92
Figura 5. 10 Relación de temperatura con la producción de biogás en la etapa a flujo intermitente.	92
Figura 5. 11 Relación del pH con la temperatura en la etapa a flujo intermitente.	93
Figura 5. 12 Relación del pH y la producción del biogás en la etapa a flujo intermitente.....	94
Figura 5. 13 Relación producción de biogás e índice de inflamabilidad en la etapa a flujo intermitente.	94
Figura 5. 14 Combustión del biogás generado en la segunda etapa de experimentación.	95
Figura 5. 15 Biogás Acumulado en la etapa a flujo intermitente.....	95

Figura 5. 16 Lodo Digerido	96
Figura 6. 1 Elementos del sistema de digestión propuesto.....	118
Figura 6. 2 Ubicación del sistema de digestión en la cafetería Cafesín	119
Figura 6. 3 Operación del sistema de digestión propuesto	119
Figura 6. 4 Diagrama de Flujos de efectivo del proyecto en el Cafesín.	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Datos típicos sobre peso específico y contenido de humedad para residuos orgánicos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas.	9
Tabla 2. 2 Análisis próximo y datos energéticos típicos para materiales encontrados en los RUO..	11
Tabla 2. 3 Datos típicos sobre el análisis del material combustible presente en los RUO	12
Tabla 2. 4 Valores típicos de rechazos inertes y contenido energético de los RUO domésticos.....	12
Tabla 2. 5 Análisis elemental de los materiales orgánicos utilizados como alimentación en los procesos de conversión biológica.	15
Tabla 2. 6 Datos sobre la fracción biodegradable de componentes seleccionados de RUO basándose en el contenido de lignina.....	16
Tabla 2. 7 Temperaturas de inicio y fin del proceso de pirólisis.	21
Tabla 2. 8 Procesos de pirólisis.	22
Tabla 2.9 Consideraciones importantes de diseño para el proceso de compostaje aerobio.Parte 1.	29
Tabla 2. 10. Consideraciones importantes de diseño para el proceso de compostaje aerobio. Parte 2.....	30
Tabla 2. 11 Clasificación de los procesos de digestión, en base a la temperatura a la que ocurren.47	
Tabla 2. 12 Consideraciones importantes de diseño para la digestión de sólidos en bajas concentraciones de los RUO.	52
Tabla 2. 13 Consideraciones importantes de diseño para la digestión anaerobia de sólidos en altas concentraciones de los RUO.	53
Tabla 2. 14 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 1).	54
Tabla 2. 15 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 2).	55
Tabla 2. 16 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 3).	56
Tabla 2. 17 Componentes del biogás en función del sustrato utilizado.	57
Tabla 2. 18 Clasificación de biogás en base a la forma de producción.	57
Tabla 3. 1 Producción Diaria Promedio, Máximo y Mínimo de ROU generados en Restaurantes de CU.....	69
Tabla 4. 1 Tipos y proporción de los residuos orgánicos generados con mayor frecuencia en la cafetería Cafesín.....	75
Tabla 4. 2 Resultado de la caracterización física de los residuos generados en la cafetería Cafesín.	76
Tabla 4. 3 Resultados de la caracterización química de los residuos generados en la cafetería Cafesín.....	76
Tabla 4. 4 Características físicas y químicas de excremento vacuno.	79
Tabla 4. 5 Proporción de volumen y peso de cada uno de los componentes en la carga para el arranque del digestor experimental.	80
Tabla 4. 6 Grado de inflamabilidad del biogás generado.....	83
Tabla 5. 1 Características químicas del lodo digerido.....	90
Tabla 5. 2 Resumen de Resultados Digestor en su arranque (experimento 1) y su operación a flujo intermitente (experimento 2).	97
Tabla 5. 3 Tiempo de retención hidráulica comparado con otros estudios en este trabajo.	99

Tabla 6. 1 Parámetros comunes de diseño para experimento 1 y experimento 2 (Método 1 a partir de datos experimentales).....	101
Tabla 6. 2 Parámetros de diseño específicos de Experimento 1 y Experimento 2.	102
Tabla 6. 3 Resumen de Cálculos de Factibilidad realizados por Método 1 para los Experimento 1 y 2.....	110
Tabla 6. 4 Parámetros Comunes de Diseño para Experimento 1 y Experimento 2.	112
Tabla 6. 5 Resumen de cálculos de factibilidad realizados por método 2 para los Experimento 1 y 2 (a partir de parámetros teóricos).....	115
Tabla 6. 6 Parámetros comunes de diseño para digestor de RUO de restaurantes de CU.....	116
Tabla 6. 7 Resumen de cálculos de factibilidad realizados por método 1 (a partir de datos experimentales) para los RUO de los restaurantes de CU.	117
Tabla 6. 8 Volúmenes de las operaciones unitarias para el Cafesín.	120
Tabla 6. 9 Poder calorífico de gas LP y biogás (Steadman, 1978; FES Iztacala UNAM).	123
Tabla 6. 10 Estimación de Gases de Efecto Invernadero, en México para el 2002 (GTZ, 2003). ...	126
Tabla 6. 11 Costos de suministros, mano de obra y puesta en marcha del sistema de digestión..	138
Tabla 6. 12 Porcentaje de incremento en el precio promedio anual del gas LP	139
Tabla 6. 13 Estimación del precio promedio anual estimado para el gas LP	139
Tabla 6. 14 Estimación del costo de operación y mantenimiento del sistema de digestión.	140
Tabla 6. 15 Ganancia monetaria por producción de biogás en el Cafesín	140

RESUMEN

En Ciudad Universitaria se pagan mensualmente \$128,340 pesos (dato del 2007) por la disposición de la basura en el bordo de Huipulco. Diariamente se generan 8 camiones de basura siendo que cada camión lleva 3 toneladas de basura, un equivalente de 24 toneladas al día. El 30% de la basura corresponde a desechos que son traídos del exterior. En Ciudad Universitaria se tienen 16 cafeterías distribuidas en la mayoría de las Facultades y Dependencias de la UNAM. Se realizó una caracterización física de los residuos orgánicos de 12 cafeterías que consistió en la determinación de peso y volumen generados diariamente por 6 meses. En promedio se generan por todas las cafeterías 426.25 kg/día de desechos orgánicos.

En el presente trabajo se propone que los desechos orgánicos sean transformados a energía a partir de su degradación anaerobia. Específicamente se tomó un caso de estudio que fue el tratamiento anaerobio de los residuos sólidos orgánicos de una de las cafeterías de Ciudad Universitaria (Cafesín del Anexo de Ingeniería o Ala Sur de la Facultad de Ingeniería). La cual, fue seleccionada por su régimen de separación de residuos sólidos orgánicos y que genera en promedio 31.7 kg/día de desechos orgánicos. Para ello, se realizaron experimentos a nivel laboratorio de un sistema de digestión de los residuos sólidos orgánicos de la cafetería Cafesín del Anexo de Ingeniería en Ciudad Universitaria. Y a partir de ellos, se realizó el estudio de factibilidad técnica, ambiental, política y económica de la aplicación de dicho sistema si se instalara en el Cafesín. El diseño del sistema de digestión a nivel laboratorio se dividió en experimento 1 el cual tuvo una duración de 16 días, y el experimento 2 el cual tuvo una duración de 30 días. Para definir la factibilidad de la propuesta se utilizaron los datos arrojados por el experimento 2. El cual presentó una producción de biogás de 0.0173 m³ biogás/ kg RUO y un TRH de 30 días. El sistema es factible pues produciría a partir de sus RUO, el 280.7% de la energía que demanda anualmente la cocina del Cafesín. El sistema evitaría la emisión de 55.26 m³ de CH₄/año, lo cual se traduce a 0.03758 toneladas métricas de CH₄/año equivalente a 0.789. Toneladas métricas de CO₂/año. En la factibilidad económica se obtuvieron los siguientes resultados: Valor Presente Neto (VPN) de \$624,926 que es positivo y se traduce a que el proyecto es viable y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 58.95 % que es mayor a la tasa de interés que el inversionista propone y por tanto significa que el proyecto es factible económicamente.

GLOSARIO

C: Carbono

C₂H₆: Etano

CH₄: Metano

CL: Contenido de lignina

CN: Relación carbono nitrógeno

CO: Monóxido de carbono

CO₂: Bióxido de carbono

CU: Ciudad Universitaria

EPA: Environmental Protection Agency

FV: Fracción biodegradable

GEI: Gases efecto invernadero

H₂: Hidrógeno

H₂S: Acido sulfhídrico

IEA: International Energy Agency

LP: Gas licuado de petróleo

Mg: Megagramo o tonelada métrica

O: Oxígeno

---OCH₃: Grupos metoxil

OECD: Organization for Economic Co-operation and Development

RUO: Residuos sólidos urbanos de tipo orgánico

S: Azufre

SEMARNAT: Secretaria de medio ambiente y recursos naturales

SENER: Secretaria de energía

SINE: Sistema nacional de emisiones

ST: Sólidos totales

SV: Sólidos volátiles

TIO: tasa de interés de oportunidad

TIR: Tasa interna de retorno

TRH: Tiempo de residencia hidráulica

VPN: Valor presente neto

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con estadísticas emitidas por la SEMARNAT, la cantidad de residuos sólidos urbanos del tipo orgánico (RUO) generados en México en el año 2008, fue de 19,707.30 miles de toneladas. Lo cual representa el 52.42% del total de residuos sólidos generados (SEMARNAT, 2009). En contraste con lo anterior se tiene que en México, se recicla sólo el 15% de residuos sólidos, a pesar de que se tiene un potencial de 47% (El Universal, 2009).

La problemática de la generación de dichas cantidades de residuos sólidos, es clara, ejemplo de esto, es el ahora espacio insuficiente para su disposición final, así como la generación de gases que contribuyen al efecto invernadero. Prueba fehaciente del mal manejo de residuos, es el Bordo Poniente, el cual recibe 12,000 toneladas al día, de los cuales aproximadamente el 40% de los mismos son de tipo orgánico.

La problemática de dicho bordo, se centra en lo siguiente: Presenta filtración de lixiviados hacia los mantos freáticos; así mismo dicho bordo, por su ubicación presenta hundimientos los cuales propician que se estime mayor capacidad de disposición de residuos de lo que en realidad puede contener; y para finalizar se puede afirmar que también emite gases que contribuyen al efecto invernadero tales como el CH_4 , el CO_2 , entre otros.

En México, se estima que el 87 % del CH_4 , emitido a la atmósfera es generado por residuos sólidos, pero lo alarmante de esta situación es el hecho de que el gas metano (CH_4), contribuye 21 veces más, al efecto invernadero que el bióxido de carbono CO_2 , por lo cual es importante capturarlo y transformarlo en CO_2 , siendo dichas acciones el tema de esta tesis.

Hoy en día existen distintas alternativas para el tratamiento de los RUO, tales como, tratamiento mecánico, pirólisis, gasificación, combustión, fermentación y digestión; todas las anteriores contribuyen a la mitigación del efecto invernadero, ya que inhiben la emisión de CH_4 a la atmósfera y además contribuyen en la producción de energía, calorífica y eléctrica, teniendo como consecuencia inmediata, la sustitución de los combustibles fósiles. Los procesos de tratamiento mecánico, gasificación y pirólisis, tienen como requerimiento esencial que la materia presente

humedad mínima, lo cual es un inconveniente, ya que los RUO de las cafeterías de CU contienen un 30% de humedad aproximadamente, lo cual hace que estos procesos no sean los más adecuados para dichos residuos, a menos de que antes se les someta a tratamiento de secado.

En cuanto a la fermentación, se tiene que es un proceso adecuado para el tratamiento de los RUO, sin embargo, conlleva subprocesos complicados y no convenientes para llevarse a cabo cerca del lugar de producción de los RUO, como lo son las cafeterías de Ciudad Universitaria.

Por último la digestión de los RUO, es el proceso que mejor se adecua a las necesidades de las cafeterías de CU ya que no implica subprocesos complicados y además, el combustible que produce (CH_4), puede ser utilizado por las cocinas de las mismas.

La cantidad de RUO separados en CU es de 14.2 ton/día aproximadamente, los cuales están compuestos por residuos de jardinería y cafeterías de CU. Cabe destacar que la cantidad de residuos generados por las cafeterías es tan sólo de 426.25 kg/día lo cual representa el 3 % del total de los RUO separados de CU.

Se estima que en CU, el costo por recolección de residuos sólidos es de \$128,340 pesos/mes lo cual representa un gasto parcialmente innecesario, ya que el 40% son RUO, los cuales podrían aprovecharse mediante degradación anaerobia. Lo cual significa que pueden someterse a un proceso en el cual se genera CH_4 utilizable para producir energía calorífica; y de la misma manera se podría evitar la emisión de gases de efecto invernadero y se reduciría la cantidad de residuos dispuestos en el relleno sanitario de Huipulco.

Una porción de los RUO generados en CU, son resultado de las actividades en 12 cafeterías, las cuales generan un total de 426.25 kg de residuos orgánicos separados al día en promedio.

En esta tesis se realizó el estudio de la cafetería perteneciente al anexo de Ingeniería la cual lleva como nombre Cafesín, dicha cafetería presenta un número de comensales promedio de 250 durante el periodo escolar, aquí se generan 31.7 kg promedio de RUO separados al día, los cuales son susceptibles de ser degradados.

La metodología que se propone utilizar para el aprovechamiento dichos residuos, la producción de biogás y su captura del biogás, es un digestor, el cual es un recipiente en el cual se dan las condiciones necesarias a los residuos sólidos de tipo orgánico, para que al ser degradados por bacterias anaerobias produzcan gas metano y bióxido de carbono principalmente.

Es importante mencionar que en esta tesis la transformación del CH_4 a CO_2 será por medio de combustión únicamente, ya que el CH_4 capturado, será utilizado como combustible en las estufas de la cafetería en estudio.

No se consideró la utilización de dicho gas para la producción de electricidad debido a que en este sitio el consumo de electricidad no está definido ya que viene incluido en la renta del local y los beneficios no serían tan palpables para el propietario, como lo serán si se reducen los costos de utilización de gas en la cocina.

1.2 OBJETIVOS

1. Determinar la capacidad de degradación anaerobia de residuos de restaurantes de Ciudad Universitaria analizando la factibilidad técnica, económica y ambiental para su implementación.
2. Diseñar, construir y operar un reactor anaerobio a escala laboratorio.
3. Diseñar un reactor para la digestión de los residuos orgánicos de un restaurante de CU.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN

2.1 BIOMASA

Antes de comenzar este capítulo es preciso señalar ciertos aspectos importantes los cuales se mencionan a continuación:

La materia orgánica constituye energía solar almacenada y es denominada energía de la biomasa. La formación de materia viva o biomasa a partir de la luz solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis. Mediante el cual, los vegetales transforman productos minerales sin valor energético, dióxido de carbono y agua, en materias orgánicas de alta energía. La fotosíntesis sólo tiene lugar en plantas verdes, que contienen clorofila, ya que este compuesto es el que posibilita toda la serie de reacciones químicas que tienen lugar. Los productos que fabrican para sí las plantas (azúcares, proteínas, grasas, etc.) y el oxígeno que simultáneamente eliminan, sirven, a su vez, directa e indirectamente, de alimentos constituyentes o energéticos a todos los demás seres que habitan el planeta.

Ahora bien, en todo proceso de conversión energética un importante factor a considerar es el rendimiento con que éste tiene lugar, es decir, la fracción del total de energía incidente (energía solar) que queda convertida en la forma de energía de interés (energía de la biomasa). Teniendo en cuenta las reacciones que gobiernan la fotosíntesis, se puede obtener el valor teórico del rendimiento fotosintético, que resulta ser, aproximadamente, de un 30%. Sin embargo, del total de la radiación solar que llega a la Tierra, sólo algo más del 40% es fotosintéticamente activa; además, sólo el 70% de ésta es absorbida por las hojas, ya que el resto, suele ser reflejada, con lo cual, la eficacia máxima teórica del proceso será de alrededor del 8% ($0,3 \times 0,4 \times 0,7$). Por otra parte, las pérdidas de energía debidas a la respiración de las plantas (estimadas es cerca de un 40%) lleva a un rendimiento máximo teórico de transformación de la energía solar en biomasa que no llega al 5%. La realidad es que los valores más altos que se encuentran en condiciones óptimas de campo son del 3%, mientras que la media para el caso de plantas de cosecha anual sobrepasa el 1%. A pesar de lo anterior, mediante el desarrollo de una adecuada tecnología es evidente que podría utilizarse el potencial energético de la biomasa para cubrir un porcentaje de la demanda energética anual (Jarabo y Elortegui, 2000).

La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta. También se le considera biomasa a la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU). La biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta energía se libera al romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua. Por este motivo, los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan biocombustibles, pudiendo ser, según su estado físico, biocombustibles sólidos, en referencia a los que son utilizados básicamente para fines térmicos y eléctricos, y líquidos como sinónimo de los biocarburantes para automoción (Fernández, 2008 a). De una forma más técnica, la OECD considera que la biomasa es cualquier material orgánico, de origen vegetal y animal, el cual es obtenido como producto o subproducto de la producción agrícola y silvícola, además de desechos urbanos e industriales, los cuales son desechos producidos por los hogares, industrias, hospitales, y el sector terciario, los cuales contienen materiales biodegradables (OECD, 2004; OECD/IEA, 2004)

La biomasa: Se puede clasificar por el tipo o fuente de biomasa que pueden ser utilizada energéticamente, una de las clasificaciones generalmente más aceptada es la siguiente (CONAE y GTZ, 2007):

- Biomasa natural: Es la que se encuentra en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana. Los recursos generados por los desechos naturales de un bosque constituyen un ejemplo de este tipo de biomasa.
- Biomasa residual seca: Se incluyen en este grupo los productos sólidos no utilizados de las actividades agrícolas y ganaderas, las forestales y de los procesos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera. Algunos ejemplos de este tipo de biomasa son el estiércol, la paja, el orujo, la madera de podas y raleo, el aserrín, etc.
- Biomasa residual húmeda: Son los vertidos denominados biodegradables como lo son las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos principalmente

excrementos. La fermentación de este tipo de biomasa genera un gas (biogás) para combustión.

- Cultivos energéticos: Son cultivos realizados con la finalidad de producir biomasa transformable en biocombustible. Se encuentran en este grupo el maíz, raps, girasol y plantaciones dendroenergéticas.

También existen otro tipo de desechos, los cuales no son considerados como biomasa, y estos son: Desechos sólidos municipales (no-renovables), los cuales son desechos producidos por los hogares, industrias, hospitales, y el sector terciario, los cuales contienen materiales no-biodegradables que son incinerados en instalaciones específicas (OECD/IEA, 2004).

- Bioenergía: Energía renovable producida a partir de la biomasa cuando se utiliza para producir calor y/o potencia y combustibles para el transporte (OECD, 2004).

2.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LOS RESIDUOS URBANOS DE TIPO ORGÁNICO (RUO)

2.1.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS

Las características físicas más importantes de los residuos orgánicos incluyen: Peso específico, contenido de humedad, tamaño de la partícula y distribución del tamaño, capacidad de campo y porosidad de los residuos compactados (Tchobanoglous y Col. 1994 a).

2.1.1.1.1 PESO ESPECÍFICO

El peso específico se define como el peso de un material por unidad de volumen (por ejemplo, Kg/m³). Como el peso específico de los RUO frecuentemente se refiere a residuos sueltos encontrados en los contenedores, no compactados, compactados, etc., la base utilizada para los valores presentados siempre debe ser citada. Los datos sobre el peso específico a menudo son necesarios para valorar la masa y el volumen total de los residuos que tiene que ser gestionados. En la Tabla 2.1 se presentan pesos específicos típicos para varios tipos de residuos tal como son encontrados en los contenedores, compactados o no compactados (Tchobanoglous y Col. 1994 a).

Cabe hacer notar que los pesos específicos de los residuos varían notablemente con la localización geográfica, la estación de año y el tiempo de almacenamiento, por lo cual se debe tener mucho cuidado a la hora de seleccionar los valores típicos.

2.1.1.1.2 CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad de los residuos normalmente se expresa de dos formas. En el método de medición peso-húmedo, la humedad de una muestra se expresa como un porcentaje del peso del material húmedo; en el método peso-seco, se expresa como un porcentaje de peso seco del material.

El método peso-húmedo se usa más frecuentemente en el campo de la gestión de residuos. En forma de ecuación, el contenido de humedad peso-húmedo se expresa de la forma siguiente en la ecuación 2.1 (Tchobanoglous y col., 1994 a):

$$M = \frac{w-d}{w} * 100 \dots\dots\dots 2.1$$

Donde:

M: Contenido de humedad

w: Peso inicial de la muestra según se entrega (kg)

d: peso de la muestra después de secarse a 105° C (kg)

Los datos típicos sobre el contenido de humedad de los componentes de los residuos urbanos de tipo orgánico, se muestran en la Tabla 2.1.

2.1.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

Si los RUO van a utilizarse como combustible, las propiedades más importantes que es preciso conocer son:

- Análisis físico
- Punto de fusión de la ceniza
- Análisis elemental
- Contenido energético

La información sobre la composición química de los RUO es importante para evaluar las opciones de procesamiento y recuperación. Cuando los residuos orgánicos se van a compostaje o se van a utilizar como alimentación para la elaboración de otros productos de conversión biológica, no solamente será importante tener información sobre los elementos mayoritarios que los componen, sino también será importante tener información sobre los elementos en cantidades traza que se encuentran en este tipo de residuos (Tchobanoglous y col., 1994 a).

2.1.1.2.1 ANÁLISIS FÍSICO

El análisis físico para los componentes combustibles de los RUO incluye los siguientes ensayos (Singer, 1981; Drobny y col., 1971):

1. Humedad: Pérdida de humedad cuando se calienta a 105°C durante una hora.
2. Materia volátil combustible: Pérdida de peso adicional con la ignición resultado de estar un cuerpo encendido o incandescente a 950°C en un crisol cubierto.
3. Carbono fijo: Rechazo combustible dejado después de retirar la materia volátil.
4. Ceniza: Peso del rechazo después de la incineración en un crisol abierto.

Los componentes combustibles de los RUO se presentan en la Tabla 2.2. El ensayo utilizado para determinar las materias combustibles volátiles en un análisis físico es diferente del ensayo de sólidos volátiles utilizado en las determinaciones biológicas.

2.1.1.2.2 PUNTO DE FUSIÓN DE LAS CENIZAS

El punto de fusión de las cenizas, es la temperatura en la que la ceniza resultante de la incineración de residuos se transforma en sólido (escoria) por la fusión y aglomeración. Las

temperaturas típicas de fusión para la formación de escorias de residuos sólidos oscilan entre 1,100 y 1,200 ° C (Tchobanoglous y col., 1994 a).

Tabla 2. 1 Datos típicos sobre peso específico y contenido de humedad para residuos orgánicos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas (Kaiser, 1966; Neissen, 1977).

TIPO DE RESIDUO	PESO ESPECIFICO, Kg/m ³		CONTENIDO EN HUMEDAD, PORCENTAJE EN PESO	
	RANGO	TÍPICO	RANGO	TÍPICO
DOMÉSTICOS NO COMPACTADOS				
Residuos de comida (mezclados)	131-481	291	50-80	70
Residuos de jardín	59-255	101	30-80	60
RESIDUOS DE JARDÍN DOMÉSTICOS				
Hojas (sueltas y secas)	30-148	59	20-40	30
Hierva verde (suelta y húmeda)	208-297	237	40-80	60
Hierva verde (húmeda y compactada)	293-831	593	50-90	80
Residuos de jardín (triturados)	267-356	297	20-70	50
Residuos de jardín (compost)	267-386	326	40-60	50
COMERCIALES				
Residuos de comida (húmedos)	475-950	540	50-80	70
Podas de árboles	101-181	148	20-80	5
AGRÍCOLAS				
Agrícolas (mezclados)	400-751	561	40-80	50
Animales muertos	202-498	359	-	-
Residuos de frutas (mezclados)	249-751	359	60-90	75
Estiércol (húmedo)	899-1,050	1,000	75-96	94
Residuos de vegetales (mezclados)	202-700	359	60-90	75

2.1.1.2.3 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS COMPONENTES DE LOS RUO

El análisis elemental de un residuo normalmente implica la determinación del porcentaje de C (carbono), H (hidrógeno), O (oxígeno), N (nitrógeno), S (azufre) y cenizas. Los resultados del

análisis elemental se utilizan para caracterizar la composición química de la materia orgánica en los RUO. También se usan para definir la mezcla correcta de materiales residuales necesaria para conseguir relaciones C/N aptas para los procesos de conversión biológica (Tchobanoglous y col., 1994 a). Los datos sobre el análisis elemental de materiales combustibles individuales se presentan en la Tabla 2.3.

2.1.1.2.4 CONTENIDO ENERGÉTICO DE LOS COMPONENTES DE LOS RUO

El contenido energético de los RUO se puede determinar: 1) Utilizando una caldera a escala real como calorímetro, 2) Utilizando una bomba calorimétrica de laboratorio y 3) Por cálculo, si se conoce la composición elemental. Por las dificultades que existen para instrumentar una caldera a escala real, la mayoría de los datos sobre el contenido de energía de los componentes orgánicos están basados en los resultados de ensayos con una bomba calorimétrica. Los datos típicos del contenido energético y de los rechazos inertes de los componentes de los RUO, se representan en la Tabla 2.4. Los valores kJ/kg dados en la tabla, pueden convertirse a una base seca mediante la ecuación 2.2 (Tchobanoglous y col., 1994 a):

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{base seca}) = \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{residuos desechados}) \left(\frac{100}{100 - \% \text{humedad}} \right) \dots\dots\dots 2.2$$

La ecuación 2.3 es la correspondiente para kJ por kilogramos en una base seca y libre de cenizas:

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \left(\begin{array}{c} \text{base seca} \\ \text{libre de cenizas} \end{array} \right) = \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \left(\begin{array}{c} \text{residuos} \\ \text{desechados} \end{array} \right) \left(\frac{100}{100 - \% \text{humedad} - \% \text{cenizas}} \right) \dots\dots\dots 2.3$$

Tabla 2. 2 Análisis próximo y datos energéticos típicos para materiales encontrados en los RUO (Kaiser, 1966; Neissen, 1977).

TIPO DE RESIDUO	ANÁLISIS PRÓXIMO, PORCENTAJE EN PESO				CONTENIDO ENERGÉTICO Kcal/kg		
	HUMEDAD	MATERIA VOLÁTIL	CARBONO FIJO	NO COMBUSTIBLE	COMO RECOGIDOS	SECO	SECO Y LIBRE DE CENIZAS
COMIDA Y PRODUCTOS DE COMIDA							
Grasas	2	95.3	2.5	0.2	8,964	9,148	9,353
Residuos de comida mezclados	70	21.4	3.6	5.0	998	3,324	3,989
Residuos de frutas	78.7	16.6	4.0	0.7	948	4,452	4,603
Residuos de carne	38.8	56.4	1.8	3.1	4,235	6,919	7,289
MADERA ARBOLES ETC.							
Residuos de jardín	60	30	9.5	0.5	1,445	3,613	3,658
Madera verde	50	42.3	7.3	0.4	1,167	2,333	2,352
Madera dura	12	75.1	12.4	0.5	4,084	4,641	4,668
Madera mezclada	20	68.1	11.3	0.6	3,689	4,620	4,657

Tabla 2. 3 Datos típicos sobre el análisis del material combustible presente en los RUO (Kaiser, 1966).

TIPO DE RESIDUO	PORCENTAJE EN PESO (BASE SECA)					
	CARBONO C	HIDRÓGENO H	OXÍGENO O	NITRÓGENO N	AZUFRE S	CENIZAS
COMIDA Y PRODUCTOS DE COMIDA						
Grasas	73.0	11.5	14.8	0.4	0.1	0.2
Residuos de comida (mezclados)	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Residuos de frutas	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2	4.2
Residuos de carne	59.6	9.4	24.7	1.2	0.2	4.9
Madera, arboles etc.						
Residuos de jardín	46.0	6.0	38.0	3.4	0.3	6.3
Madera verde	50.1	6.4	42.3	0.1	0.1	1.0
Maderas duras	49.6	6.1	43.2	0.1	<0.1	0.9
Madera mezclada	49.5	6.0	42.7	0.2	<0.1	1.0
Viruta de madera (mezclada)	48.1	5.8	45.5	0.1	<0.1	0.4

Tabla 2. 4 Valores típicos de rechazos inertes y contenido energético de los RUO domésticos (Kaiser, 1966; Neissen, 1977).

COMPONENTES	RECHAZOS INERTES PORCENTAJE ^b %		ENERGÍA ^c , Kcal /kg	
	RANGO	TÍPICO	RANGO	TÍPICO
Residuos de comida	2-8	5	833-1 667	1 111
Residuos de jardín	2-6	4.5	556-4 444	1 556

b: Después de combustión total

c: Sobre una base como desechados

Si no se puede disponer de valores de poder calorífico, los valores aproximados del poder calorífico para los materiales individuales de los residuos pueden determinarse mediante el uso de la ecuación 2.4 (Tchobanoglous y col., 1994 a).

$$\frac{kJ}{kg} = \left[145 C + 610 \left(H_2 - \frac{1}{8} O_2 \right) + 405 + 10 N \right] * 2.326 \dots \dots \dots 2.4$$

Donde

C= Carbono, porcentaje en peso

H₂= Hidrógeno, porcentaje en peso

O₂= Oxígeno, porcentaje en peso

S= Azufre, porcentaje en peso

N= Nitrógeno, porcentaje en peso

En la ecuación 2.4, el contenido de oxígeno está dividido por ocho y restado del hidrógeno para justificar la cantidad de hidrógeno que reacciona con el oxígeno presente y, por lo tanto, no contribuye al contenido energético del residuo.

2.1.1.2.5 NUTRIENTES ESENCIALES Y OTROS ELEMENTOS

Cuando los RUO se van a utilizar como alimentación para la elaboración de productos biológicos de conversión, tales como compost, metano y etanol, la información sobre los nutrientes esenciales y los elementos del material residual es importante respecto a la disponibilidad de nutrientes de microorganismos, y para valorar los usos finales que puedan tener los materiales restantes después de la conversión biológica. Los nutrientes esenciales y los elementos encontrados en los principales materiales que conforman los RUO se presentan en la Tabla 2.5.

2.1.1.3 PROPIEDADES BIOLÓGICAS

La mayoría de los RUO se pueden clasificar de la forma siguiente:

1. Constituyentes solubles en agua, tales como azúcares, féculas, aminoácidos, diversos ácidos orgánicos.
2. Hemicelulosa, un producto de condensación de azúcares con cinco y seis carbonos.

3. Celulosa, un producto de condensación de glucosa de azúcar con seis carbonos.
4. Grasas, aceites y ceras, que son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
5. Lignina, un material polímero que contiene anillos aromáticos con grupos metoxi (---OCH₃), cuya fórmula exacta aún no se conoce (presente en algunos productos de papel como periódicos y en tablas de aglomerado).
6. Lignocelulosa, una combinación de lignina y celulosas.
7. Proteínas, que están formadas por cadenas de aminoácidos.

Quizás la característica biológica más importante de la fracción de los residuos orgánicos, es que casi todos los componentes orgánicos pueden ser convertidos biológicamente en gases y sólidos orgánicos e inorgánicos relativamente inertes (Tchobanoglous y col., 1994 a).

2.1.1.3.1 BIODEGRADABILIDAD DE LOS COMPONENTES DE RESIDUOS ORGÁNICOS

El contenido en sólidos volátiles (SV), determinado a 550°C, frecuentemente se utiliza como una medida de la biodegradabilidad de los RUO. El uso de SV para la descripción de los RUO es erróneo, porque algunos de los constituyentes de los RUO son altamente volátiles pero bajos en biodegradabilidad (por ejemplo, el papel periódico y algunos recortes de plantas). Alternativamente, se puede usar el contenido de lignina de un residuo para estimar la fracción biodegradable, mediante la relación siguiente (Chandler y col., 1980):

$$BF = 0.83 - (0.028 * LC) \dots\dots\dots 2.5$$

Donde

BF = Fracción biodegradable expresada en base a los sólidos volátiles (SV)

0.83 = Constante empírica

0.028 = Constante empírica

LC = Contenido de lignina de los SV expresado como un porcentaje en peso seco

Como puede observarse en la Tabla 2.6 los residuos con altos contenidos de lignina, tales como papel periódico, son significativamente menos biodegradables.

Tabla 2. 5 Análisis elemental de los materiales orgánicos utilizados como alimentación en los procesos de conversión biológica (Tchobanoglous y col., 1994a).

CONSTITUYENTE	SUSTRATO DE ALIMENTACIÓN (BASE SECA)		
	UNIDAD	RESIDUOS DE JARDÍN	RESIDUOS DE COMIDA
NH_4-N	ppm	149	205
NO_3-N	ppm	490	4,278
P	ppm	3,500	4,900
PO_4-P	ppm	2,210	3,200
K	%	2.27	4.18
SO_4-S	ppm	882	855
Ca	%	0.42	0.43
Mg	%	0.21	0.16
Na	%	0.06	0.15
B	ppm	88	17
Se	ppm	<1	<1
Zn	ppm	20	21
Mn	ppm	56	20
Fe	ppm	451	48
Cu	ppm	7.7	6.9
Co	ppm	5	3
Mo	ppm	1	<1
Ni	ppm	9	4.5
W	ppm	4	3.3

Tabla 2. 6 Datos sobre la fracción biodegradable de componentes seleccionados de RUO basándose en el contenido de lignina (Tchobanoglous y col., 1994a).

COMPONENTE	SÓLIDOS VOLÁTILES (SV) PORCENTAJE DE SÓLIDOS TOTALES (ST)	CONTENIDO DE LIGNINA (CL) PORCENTAJE DE SV	FRACCIÓN BIODEGRADABLE (FV) ^a
Residuos de comida	7-15	0.4	0.82
Papel			
Papel de periódico	94	21.9	0.22
Papel de oficina	96.4	0.4	0.82
Cartón	94	12.9	0.47
Residuos de jardín	50-90	4.1	0.72

a. Calculado utilizando la ecuación 2.5.

2.1.1.3.2 PRODUCCIÓN DE OLORES

Los olores pueden desarrollarse cuando los RUO se almacenan durante largos periodos de tiempo.

Normalmente la formación de olores se produce por la descomposición anaerobia de los RUO fácilmente degradables. Por ejemplo, bajo condiciones anaerobias (reducción), el sulfato SO_4^{-2} , puede ser reducido a sulfuro S^{-2} , que se combina con el hidrógeno para formar H_2S . El ion sulfuro también puede combinarse con sales metálicas que pueden estar presentes, como hierro, para formar sulfuros metálicos. El color negro de los residuos sólidos que han experimentado descomposición anaerobia, se debe principalmente a la formación de sulfuros metálicos (Tchobanoglous y col., 1994a).

2.2 TECNOLOGÍAS PARA LA CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA

Las tecnologías más adecuadas para convertir la biomasa en energía y/o en combustibles dependen, entre otros factores de (Concheiro y Rodríguez, 1985):

- a. La clase de biomasa
- b. Su contenido de humedad
- c. Las condiciones del proceso de conversión (tasa de alimentación, tamaño de las partículas, relación biomasa-aire, temperatura de conversión, etc)

d. El uso final de producto energético

La transformación de la biomasa en energía y/o en combustibles puede dividirse en tres grupos, de acuerdo con la naturaleza de los procesos implicados (Jarabo y Elortegui, 2000).

a. Procesos termoquímicos

b. Procesos bioquímicos

c. Extracción directa (conversión mecánica)

En la Figura 2.1 se muestra esquemáticamente los procesos de conversión de la biomasa a electricidad y/o energía térmica.

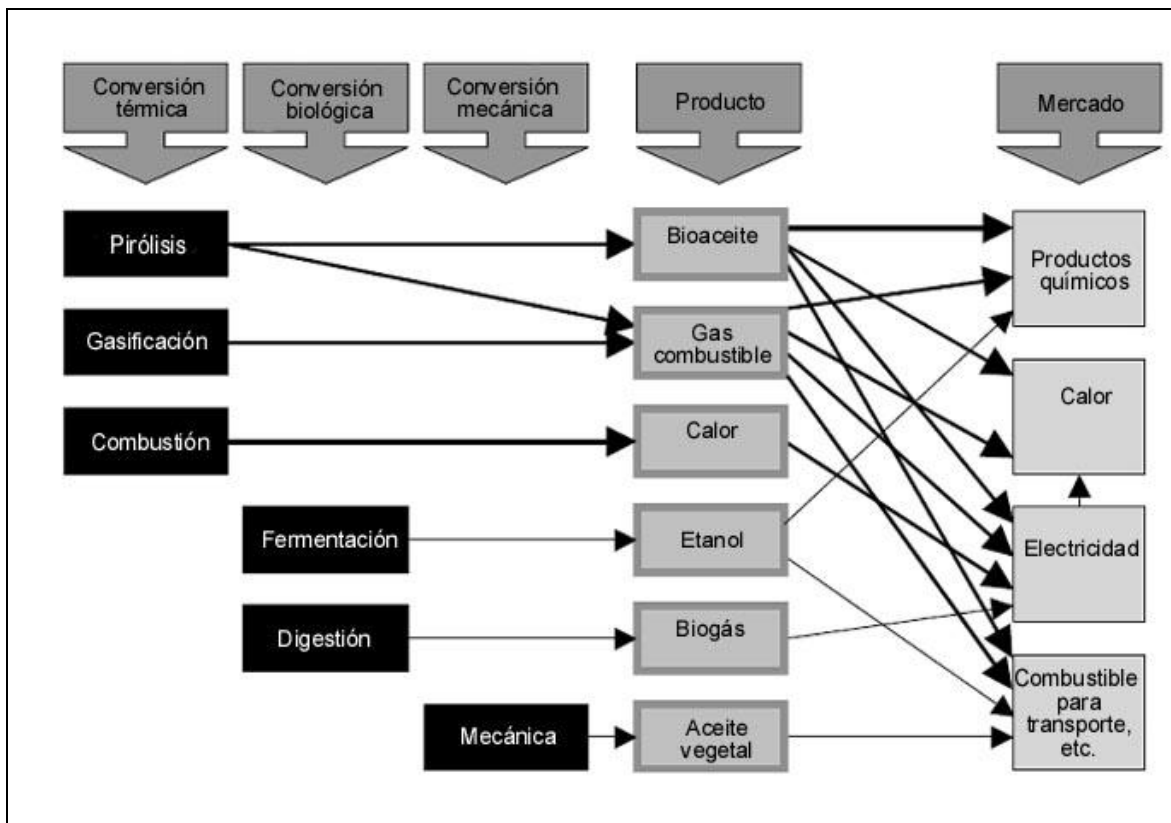


Figura 2. 1 Procesos de conversión de la biomasa, productos y aplicaciones (OECD, 2004).

2.2.1 PROCESOS TERMOQUÍMICOS

Estos procesos se basan en someter la biomasa a la acción de altas temperaturas, en condiciones variables de oxidación, encontrándose implicadas reacciones químicas irreversibles. Pueden subdividirse en tres amplias categorías, dependiendo de que el calentamiento se lleve a cabo con exceso de oxígeno (combustión), en presencia de cantidades limitadas de oxígeno (gasificación) o en ausencia de oxígeno (pirólisis).

Los materiales más idóneos para su conversión termoquímica son los de bajo contenido de humedad y alto en lignocelulosa, tales como madera, paja, cáscaras, etc. Estos métodos de conversión dan como resultado, mezclas de combustibles, sólidos, líquidos y gaseosos, con diversos valores energéticos (Jarabo y Elortegui, 2000).

2.2.1.1 COMBUSTIÓN

Es la oxidación completa de la materia para dar dióxidos de carbono, vapor de agua, cenizas, y principalmente, calor, por lo que éste se convierte en el único componente energético útil del proceso. Las variables que afectan principalmente al buen funcionamiento de este proceso son:

a. La proporción de oxígeno en el gas de entrada: La insuficiencia de oxígeno impide que la reacción sea completa, dando lugar a la producción de carbón y monóxido de carbono (gas altamente contaminante). Para evitar este tipo de complicaciones, generalmente se trabaja con un exceso de oxígeno comprendido entre el 20 y 40% del teórico necesario.

b. Temperatura de combustión: Es aquella que alcanzan los productos de la combustión debido al calor generado en la reacción, que es exotérmica, descontando las pérdidas debidas a la radiación y al combustible no quemado o quemado de forma incompleta. Los valores normales se encuentran en el rango de 600 a 1,300°C; niveles inferiores producen un efecto similar en el proceso que el defecto de oxígeno.

c. Características del combustible: Estas características se pueden dividir en tres grupos:

c.1. Físicas: Tal como la densidad, la granulometría y el contenido de humedad, siendo este último muy importante debido a que la vaporización del agua consume gran parte de la energía producida. Por lo anterior, se aconseja utilizar para este proceso solo biomasa de bajo contenido de agua.

c.2. Características químicas: En cuanto a éstas, el combustible debe tener bajos contenidos de azufre, cloro y flúor (aspecto que cubre satisfactoriamente la biomasa vegetal), ya que en caso contrario se produciría corrosión en el equipo y gases altamente contaminantes.

c.3. Características térmicas: Las propiedades energéticas de la biomasa dependen ostensiblemente de sus características físicas y químicas, principalmente de su contenido de carbono.

La combustión presenta una elevada eficiencia térmica. Cuando se utiliza biomasa seca (<20% de humedad), el rendimiento oscila entre 80 y 85%, mientras que en el caso más general de biomasa (>50% de humedad), el rendimiento se encuentra entre el 65 y el 70%. No obstante, la eficiencia global del proceso, considerando en sus productos finales (electricidad y vapor de baja presión), oscila alrededor del 30%.

La energía obtenida puede destinarse a la producción de calor (en forma de agua o de aire caliente) para el uso doméstico o industrial y la producción de electricidad (Jarabo y Elortegui, 2000).

2.2.1.2 GASIFICACIÓN

En la gasificación, la biomasa se convierte en una mezcla de gases que contienen monóxido de carbono e hidrógeno como principales combustibles. La gasificación se basa en la oxidación incompleta de la biomasa empleada como materia prima, produciendo gases de bajo a alto contenido calorífico (Concheiro y Rodríguez, 1985). En este proceso, la temperatura de operación es un factor importante. Para obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa resultante (contenidos altos en hidrógeno y monóxido de carbono) es necesario una temperatura mínima de 700 a 800°C y una máxima de 1,500°C.

La utilización como comburente de aire u oxígeno, da lugar a dos procesos de gasificación sustancialmente distintos. La presencia o no de nitrógeno en el comburente hace que se obtengan dos tipos diferentes de gas (Jarabo y Elortegui, 2000), tal como se muestra en la Figura 2.2.

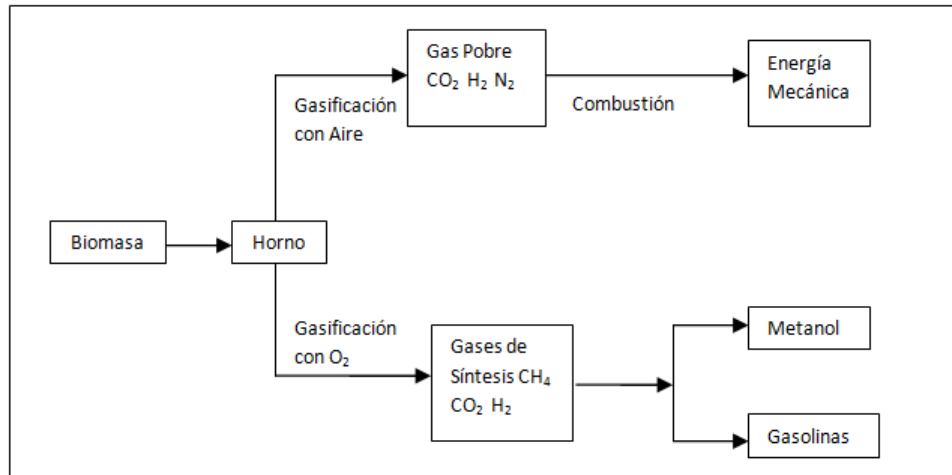


Figura 2. 2 Procesos de gasificación (Jarabo y Elortegui, 2000).

Gas de gasógeno o gas pobre: Su poder calorífico es muy bajo entre 3.4 y 5.4 MJ/m³. La presencia de nitrógeno impide su transformación en productos más nobles, y no se recomienda su almacenamiento y transporte por su baja densidad energética. La biomasa necesaria para la producción de este gas debe presentar humedad inferior al 20%.

Gas de síntesis: Su poder calorífico oscila entre 5.0 y 10.9 MJ/m³. Este gas tiene la posibilidad de transformarse en combustibles líquidos como el metano y gasolinas (Jarabo y Elortegui, 2000).

2.2.1.3 PIRÓLISIS

Es un proceso que consiste en la descomposición de la materia orgánica por la acción del calor en ausencia de oxígeno, para la recuperación del material volátil de las materias líquidas y sólidas, en especial de las orgánicas, así como la obtención de residuo sólido carbonizado. De manera general, se puede decir que la temperatura a la que comienza y finaliza la pirólisis, se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2. 7 Temperaturas de inicio y fin del proceso de pirólisis (Jarabo y Elortegui, 2000; Creus, 2004).

PROCESO DE PIRÓLISIS		
TEMPERATURA DE INICIO DEL PROCESO EN °C	TEMPERATURA DE FIN DEL PROCESO EN °C	REFERENCIA
200	500	Creus, 2004
275	450	Jarabo y Elortegui, 2000

La naturaleza y composición de los productos finales dependen de las propiedades de la biomasa tratada, de la temperatura y presión de operación, y de los tiempos de retención del material en el reactor. Así los productos de reacción se pueden clasificar en tres grandes grupos:

1. Gases compuestos por hidrógeno (H_2), óxidos de carbono (CO , CO_2), metano (CH_4), etano C_2H_6 y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros (éstos son de peso molecular bajo). Estos gases pueden convertirse en energía quemándose en motores de gas con un rendimiento efectivo del 33% en la producción de electricidad (Jarabo y Elortegui, 2000; Creus, 2004).

2. Líquidos que contienen compuestos hidrocarbonados complejos, entre los que destacan los de carácter oxigenado, como pueden ser cetonas, ácido acético, compuestos aromáticos, etc (Jarabo y Elortegui, 2000; Creus, 2004).

3. Residuos sólidos carbonos que contienen carbono y alquitranes, así como cenizas. Este residuo de carbón vegetal o coque de pirólisis puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo. Así, el coque de pirólisis puede introducirse en un gasificador y convertirse en gas combustible (gas de síntesis) y en un granulado vítreo totalmente inerte que puede ser usado como producto energético en centrales de energía o en la industria de la construcción o ser depositado en vertederos de basura sin provocar ningún problema medioambiental (Jarabo y Elortegui, 2000; Creus, 2004).

Existen diferentes tipos de procesos de pirólisis en función de las condiciones físicas que se mantengan en el horno como la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la presión,

etc., que influyen en la distribución de los productos obtenidos (Creus, 2004), algunos de estos procesos se muestran en la Tabla 2.8

Tabla 2. 8 Procesos de pirólisis (Creus, 2004).

PIRÓLISIS	TIEMPO DE RESIDENCIA	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	PRESIÓN bar	TEMPERATURA MÁXIMA °C	PRODUCTO PRINCIPAL
Carbonización	Horas- días	Muy baja	1	400	Sólido (carbón vegetal)
Convencional	5-30 minutos	Baja	1	600	Gas, líquido y sólido
Rápida	0.5-5 segundos	Muy alta	1	650	Líquido
Líquido- flash	< 1 segundo	Alta	1	< 650	Líquido
Gas-flash	< 1 segundo	Alta	1	> 650	Gas
Ultra	<0.5 segundos	Muy alta	1	1,000	Gas productos químicos y bioaceites
Vacio	2-30 segundos	Media	< 0.1	400	Líquido

2.2.2 PROCESOS BIOQUÍMICOS

Son aquellos procesos que se llevan a cabo mediante diversos tipos de microorganismos, ya sean contenidos en la biomasa original o añadidos durante el proceso. Estos microorganismos producen la degradación de las moléculas complejas constituyentes de la biomasa a compuestos más simples, de alta densidad energética. Se utilizan estos procesos, fundamentalmente, para tratar biomasa natural o residual de alto contenido en humedad y los más corrientes son la

fermentación alcohólica para producir etanol y la degradación anaerobia, para producir metano (Jarabo y Elortegui, 2000).

2.2.2.1 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

Las plantas almacenan la mayor parte de la energía solar que captan en forma de hidratos de carbono, compuestos que pueden presentarse de manera simple, en forma de azúcares, o en forma de polímeros: Almidón o celulosa. Cualquier producto que contenga azúcares fermentables o hidratos de carbono transformables en almidón o celulosa puede servir para obtener alcohol. Cuando la materia prima es rica en almidón o celulosa, es necesario someterla previamente a ciertos procesos para transformarla en compuestos fermentables.

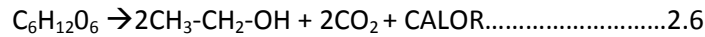
El proceso global de obtención de etanol a partir de la biomasa se puede dividir en las siguientes etapas (Jarabo y Elortegui, 2000):

1. Pre tratamiento de la biomasa: Tiene como objetivo transformar la biomasa a utilizar cuando ésta es poco asequible a la fermentación. El tratamiento más general y aplicable a todas las materias primas es el mecánico, ya que su objetivo fundamental es reducir la biomasa a partículas pequeñas, de forma que aumente la superficie de contacto para los procesos posteriores. En esta fase se emplea la trituración.

2. Hidrólisis: Es la ruptura de las moléculas en medio acuoso, tiene como finalidad la transformación de los polímeros de glucosa (almidón y celulosa) en azúcares sencillos. Esta operación se efectúa mediante el uso de reactivos químicos (hidrólisis química).

La hidrólisis enzimática se lleva a cabo con la ayuda de enzimas obtenidas de microorganismos, dependiendo de las condiciones óptimas del proceso, de la naturaleza del organismo productor de enzimas, y sus rendimientos de pretratamiento efectuado y del sustrato empleado. La hidrólisis química no es específica y exige condiciones de proceso muy cuidadosas. Una vez que la biomasa que contiene hidratos de carbono se ha transformado en una disolución azucarada, se puede someter a un proceso de fermentación, con objeto de convertir los azúcares en etanol.

3. Fermentación alcohólica: Es el proceso de conversión de la glucosa en etanol, por la acción de microorganismos, que se produce a través de una compleja secuencia de reacciones químicas, desde el punto de vista técnico:



Según esta reacción, el rendimiento en etanol es de 51.1 % en peso, pero en la práctica este valor es algo inferior, ya que alrededor de un 5% de la glucosa es utilizada por los microorganismos (*Saccharomyces cerevisiae*) para producir nuevas células y otros compuestos de su metabolismo.

En la actividad de las levaduras influyen una gran cantidad de factores, entre los que destacan:

- a. Temperatura: La velocidad óptima de fermentación se obtiene operando a temperaturas entre 27 y 32°C.
- b. Acidez: El pH de la disolución debe controlarse entre 4 y 5, ya que durante el proceso se forman ácidos.
- c. Concentración de azúcares: Valores superiores al 22% en peso pueden inhibir el crecimiento celular en las fases iniciales.
- d. Concentración de etanol: Valores superiores al 14% en peso destruyen las levaduras antes de que se complete la fermentación.

Tradicionalmente la fermentación alcohólica ha sido un proceso discontinuo de duración entre 2 y 3 días, después de los cuales se retira la masa fermentada para su destilación.

4. Separación y purificación del etanol: En la fermentación, el etanol solo se encuentra en una concentración máxima comprendida entre el 8 y 12% en peso, lo que obliga a una separación y purificación del etanol, si se quiere obtener éste libre agua. Industrialmente se emplea para ello la rectificación (destilación con enriquecimiento del vapor), operación que se lleva a cabo normalmente en dos etapas, al final de las cuales se obtiene un alcohol del 96% en volumen de pureza. Esto es imposible de superar por destilación, ya que se trata de una mezcla azeotrópica, es decir, de punto de ebullición constante. Este tipo de etanol es el que se comercializa normalmente. Sin embargo, si se desea obtener etanol absoluto es necesario llevar a cabo una destilación adicional utilizando un tercer componente (benceno, éter, hexano, etc) que forme a su vez un azeotropo con el agua y libere el etanol seco (con una pureza mínima del 99.5%). En la figura 2.3 se muestra un esquema global de la obtención del etanol.

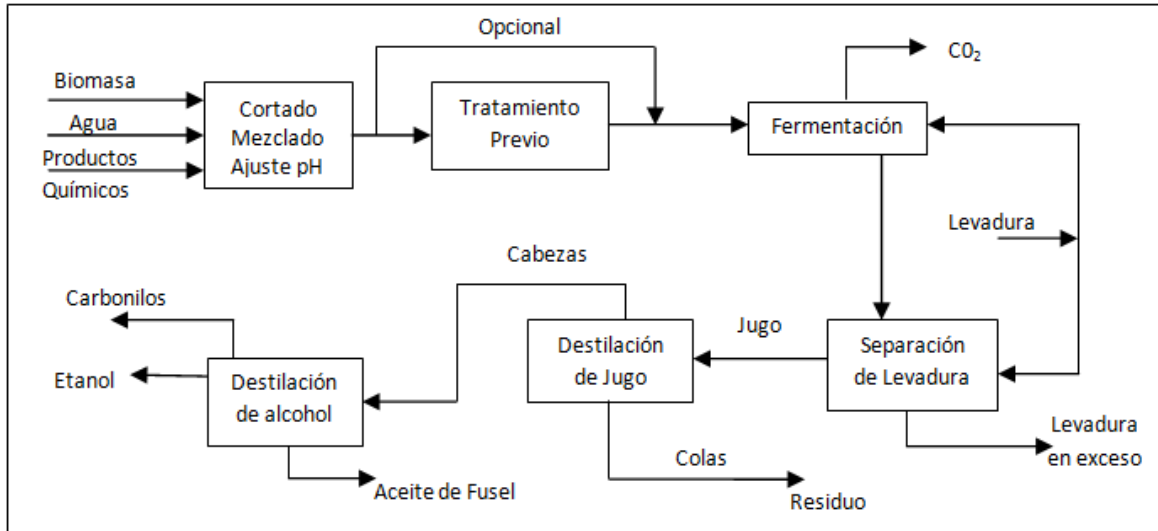


Figura 2. 3 Esquema global del proceso de obtención del etanol (Jarabo y Elortegui, 2000).

2.2.2.2 DIGESTIÓN

La digestión es una fermentación microbiana en rigurosas condiciones de ausencia de oxígeno (medio anaerobio), que da lugar a una mezcla de productos gaseosos (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como biogás y a una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodo o fango), en la que se encuentran los componentes difíciles de degradar, junto con el nitrógeno, fósforo y otros elementos minerales inicialmente presentes en la biomasa (Jarabo y Elortegui, 2000).

Cabe destacar que los RUO tienen alto contenido de humedad lo que los hace muy susceptibles de ser digeridos. Aunque la digestión es un proceso ampliamente conocido en la práctica, se posee en la actualidad una información muy limitada sobre su química y su microbiología. Esto es debido a que, por una parte, bajo el punto de vista químico, se desarrollan cientos de posibles reacciones, cada una de ellas catalizada por enzimas específicas para dar compuestos intermedios distintos. Por otro lado, en el aspecto microbiológico, el número de especies bacterianas presentes es muy elevado y las relaciones entre ellas son altamente complejas.

En líneas generales, se puede decir que durante la digestión, la biomasa de partida, compuesta de moléculas complejas, se descompone en moléculas más pequeñas en las tres etapas siguientes:

hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (Jarabo y Elortegui, 2000). Se explicará más a detalle este proceso, en el punto 2.3.

2.2.2.3 COMPOST

El proceso de compostaje, es la descomposición biológica y estabilización de un sustrato orgánico, bajo condiciones que permitan el desarrollo de temperaturas en el rango termófilo (35° C) como resultado del proceso biológico aerobio exotérmico, para producir un producto final estable, libre de patógenos y semillas y que pueda ser aplicado al suelo de forma beneficiosa. Este producto final estable y beneficioso para el suelo, recibe el nombre de compost, y el sustrato orgánico o materia prima a la que se le aplica el proceso puede ser cualquier residuo orgánico biodegradable, en la Figura 2.4 se describe este proceso.

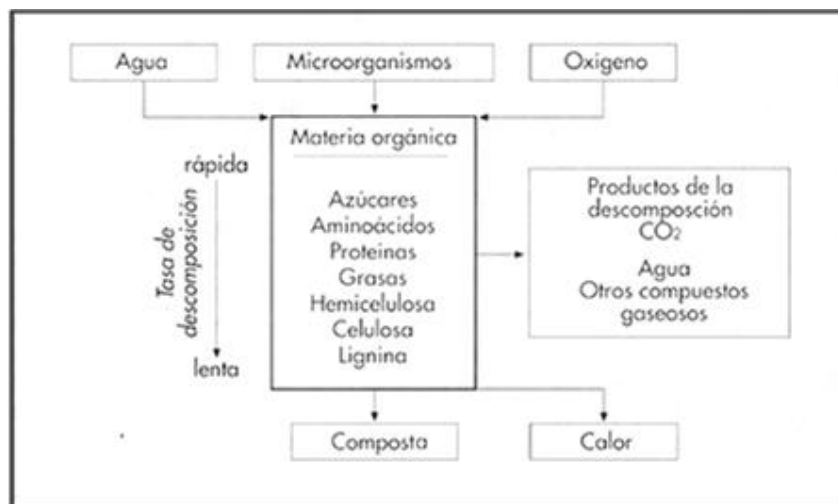


Figura 2. 4 Proceso de compostaje. (Castells, 2005)

2.2.2.3.1 FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

El proceso está constituido por dos fases consecutivas: Descomposición y maduración tal como se muestra en la Figura 2.5 En la primera, diferentes poblaciones de bacterias, actinomiceto y hongos, trabajando de forma simultánea o consecutiva, descomponen los constituyentes de la materia orgánica como hidratos de carbono, proteínas, lípidos, estableciéndose relaciones de sinergia en algunos casos y de competencia por el sustrato en otros. En medio aerobio, las

reacciones son exotérmicas, de manera que si se dan las condiciones físicas adecuadas, se produce un aumento de la temperatura de la masa de descomposición, pudiendo llegar a superar los 70° C en un día.

Este aumento de la temperatura favorece el crecimiento de microorganismos termófilos, y si ésta se mantiene durante el tiempo suficiente, se consigue la destrucción de semillas de malas hierbas, huevos y larvas de insectos y de microorganismos patógenos. Esta es la base de las propiedades de higienización del proceso.

Esta fase de descomposición puede dividirse en tres etapas. Una inicial mesofílica durante la cual diversas familias de microorganismos mesófilos inician la descomposición de los compuestos fácilmente degradables, provocando un incremento de la temperatura y un ligero descenso del pH debido a la formación de ácidos orgánicos. En la segunda etapa, termofílica, aparecen los microorganismos termófilos y se superan los 40 °C. Si se llega a los 60 °C, los hongos se inactivan y la descomposición tiene lugar debido a los actinomicetos y bacterias formadoras de esporas. Las sustancias fácilmente degradables como proteínas, azúcares y lípidos, son rápidamente consumidas y la mayoría de patógenos son eliminados. A su vez, el pH se recupera y se alcaliniza debido al consumo de los ácidos orgánicos y al aumento de la concentración de amonio por descomposición de proteínas. Conforme la concentración relativa de compuestos orgánicos resistentes aumenta, la velocidad de descomposición y el consumo de oxígeno decrecen.

En la tercera etapa de la fase de descomposición, la temperatura empieza a disminuir, los hongos termofílicos reinvasan el material en proceso de compostaje, y la celulosa y hemicelulosa inician su descomposición. Esta etapa es la más exigente del proceso y su buen desarrollo condiciona su continuidad. Estas tres etapas tienen una duración entre dos semanas y algunos meses, dependiendo de la composición inicial y del control de las condiciones de operación. En esta fase, biopolímeros como la celulosa y la lignina quedan parcialmente alterados, y pasan a ser, en la fase de maduración, las estructuras básicas para la formación de nuevas macromoléculas, que incluirán el amonio liberado durante la primera fase.

El aumento de temperatura y la necesaria renovación de aire para mantener concentraciones adecuadas de oxígeno favorecen la evaporación del agua, provocando un enfriamiento, obteniendo un producto más seco y favoreciendo la pérdida de compuestos volátiles que, como el

amoníaco, debe evitarse. Debe mantenerse un control sobre el proceso, de manera que el descenso de la temperatura y el secado no se produzcan hasta que la etapa de descomposición e higienización se hayan completado. Este control también ha de servir para evitar temperaturas suficientemente altas como para producir una esterilización de medio y por tanto un paro en la actividad biológica.

En la etapa de maduración tienen lugar procesos de biopolimerización, para formar moléculas complejas y estables, y microorganismos mesófilos y diversa microfauna colonizan el material para obtener, en un tiempo del orden de unos pocos meses, un compost completamente estabilizada y parcialmente humificado. La optimización del proceso consiste en encontrar las condiciones de operación que permitan el mínimo tiempo de las reacciones de la fase de descomposición. Trabajar con tecnologías que permitan tener la masa en descomposición en recinto cerrado y en condiciones controladas de aireación, humedad y temperatura, permite obtener tiempos de descomposición del orden de pocas semanas (Castells, 2005).

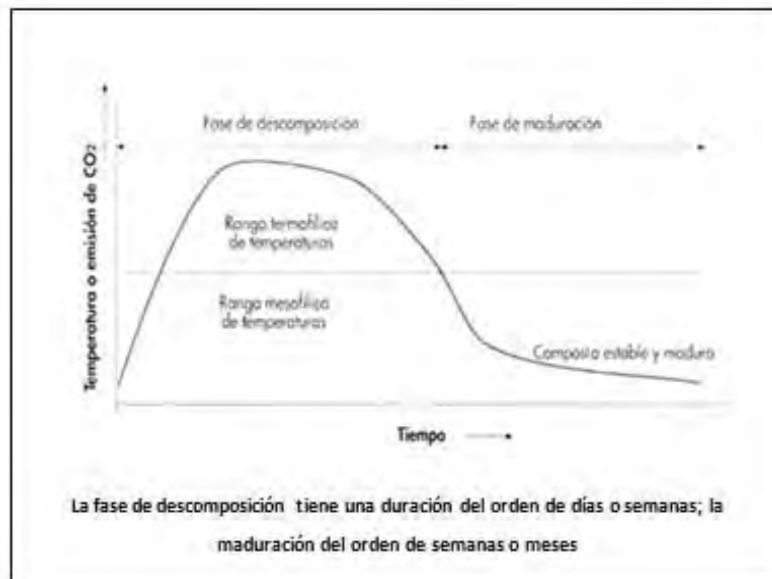


Figura 2. 5 Fases del proceso de compostaje. (Castells, 2005).

2.2.2.3.2 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL PROCESO DE COMPOSTAJE

Las principales consideraciones de diseño asociadas con la descomposición biológica aerobia de RUO se presentan en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Consideraciones importantes de diseño para el proceso de compostaje aerobio (Tchobanoglous y col., 1994 b). Parte 1.

PARÁMETRO	OBSERVACIONES
Tamaño de partícula	Para obtener resultados óptimos el tamaño de los residuos sólidos debería estar entre 25 y 27 mm.
Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)	Las relaciones carbono-nitrógeno iniciales (por masa) de entre 25 y 50 son óptimas para el compostaje aerobio. Con relaciones más bajas se emite amoníaco. También se impide la actividad biológica con relaciones más bajas. Con relaciones más altas, el nitrógeno puede ser un nutriente limitante.
Mezcla e inoculación	El tiempo de compostaje puede reducirse mediante el inóculo con residuos sólidos parcialmente descompuestos, aproximadamente del 1 al 5 % en peso. También pueden añadirse fangos de aguas residuales a los residuos sólidos preparados. Cuando se añaden los fangos, el contenido en humedad final es la variable fundamental.
Contenido en humedad	El contenido en humedad debería estar entre el 50 y el 60 % durante el compostaje. El valor óptimo parece ser el 55%.
Mezcla / volteo	Para prevenir el secado, encostramiento y la canalización de aire, el material que está compostándose debería ser mezclado o volteado regularmente o cuando sea necesario. La frecuencia de la mezcla o volteo dependerá del tipo de compostaje.

Tabla 2. 10. Consideraciones importantes de diseño para el proceso de compostaje aerobio (Tchobanoglous y col., 1994 b). Parte 2.

PARÁMETRO	OBSERVACIONES
Temperatura	Para obtener mejores resultados, la temperatura debería mantenerse entre 50 y 55 °C durante los primeros días y entre 55 y 60 °C para el resto del período de compostaje activo. Si la temperatura sube por encima de 66 °C, la actividad biológica se reduce significativamente.
Control de patógenos	Si se lleva a cabo correctamente, se pueden destruir todos los patógenos, hierbas malas y semillas, durante el compostaje. Para conseguir esto, la temperatura debe mantenerse entre 60 y 70 °C durante 24 horas.
Requisitos de aire	El aire con por lo menos el 50 % de la concentración del oxígeno inicial restante debería llegar a todas las partes del material que está compostándose para conseguir resultados óptimos, especialmente en los sistemas mecánicos.
Control de Ph	Para lograr una descomposición aerobia óptima, el pH debería permanecer en el rango de 7 a 7.5. Para minimizar la pérdida de nitrógeno en la forma de gas amonio, el pH no debería sobrepasar un valor de 8.5.
Grado de descomposición	El grado de descomposición puede estimarse mediante la medición de la bajada final de temperatura, el grado de la capacidad de autocalentamiento, la cantidad de materia orgánica descomponible y resistente en el material de compostaje, la subida en el potencial redox, la absorción de oxígeno, el crecimiento del hongo <i>Chaetomium gracilis</i> , y el ensayo almidón-yodo.
Necesidades de terreno	Las necesidades de terreno para una planta con una capacidad de 50 Ton/día serán de 6,000 a 8,000 m ² . El área de terreno necesario para una planta mayor será menor en relación a Ton/día.

2.2.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN QUÍMICA DIRECTA

Algunos combustibles pueden obtenerse de la biomasa directamente por extracción, ya que se tienen diversas especies vegetales que producen en su metabolismo hidrocarburos o compuestos afines, de elevado poder calorífico, que se pueden utilizar directamente como combustibles. Estos compuestos se pueden obtener mediante un proceso de extracción directa, aunque en la actualidad no está completamente definido el esquema de operación, debido a que está muy condicionado a cada tipo de especie vegetal. En general, las plantas cortadas se secan y se muelen a tamaños pequeños, que se someten a extracción con acetona u otro disolvente similar. Extracciones posteriores con hexano y benceno permiten obtener varios tipos de aceites, formados por hidrocarburos, y un residuo rico en proteínas e hidratos de carbono, que puede ser utilizado como materia prima para la producción de etanol por fermentación (Jarabo y Elortegui, 2000).

2.2.4 TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES

La biomasa es una excelente alternativa energética por dos razones. La primera es que, a partir de ella se pueden obtener una gran diversidad de productos; la segunda, se adapta perfectamente a todos los campos de utilización actual de los combustibles tradicionales. Así, mediante procesos específicos, se puede obtener toda una serie de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que pueden ser aplicados para cubrir las necesidades energéticas de confort, transporte, cocinado, industria y electricidad, o servir de materia prima para la industria (Fernández, 2008a).

2.2.4.1 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Dentro del grupo de los biocombustibles sólidos, los más importantes son los de tipo primario, constituidos por materias lignocelulósicas procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen residuos de dicha naturaleza. La paja, los restos de poda de árboles, la leña, las cortezas, entre otras, son materia típica para elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrícola.

También las cáscaras de frutos secos, huesos de aceituna y otros frutos y los restos de las industrias del corcho, la madera y el mueble, constituyen una buena materia prima para la

fabricación de biocombustibles sólidos. Otro grupo de biocombustibles sólidos lo constituye el carbón vegetal, que resulta de un tratamiento térmico con bajo contenido en oxígeno de la biomasa-leña, pero al ser el resultado de una alteración termoquímica de la biomasa primaria, debe ser considerado de naturaleza secundaria. Aunque una parte importante de la biomasa se utiliza directamente, como por ejemplo la leña en hogares y chimeneas, la utilización energética moderna de los biocombustibles sólidos requiere un acondicionamiento especial (Fernández, 2008a).

2.2.4.2 BIOCMBUSTIBLES LÍQUIDOS

La denominación de biocombustibles líquidos se aplica a una serie de productos de origen biológico utilizables como combustibles de sustitución de los derivados del petróleo o como aditivos de éstos para su uso en motores. Se pueden utilizar tanto en los motores de explosión de encendido por chispa (ciclo Otto), como en los de combustión interna por compresión (ciclo Diesel) (Fernández, 2008b). Estos productos se obtienen mediante la transformación de materias primas de origen vegetal y presentan determinadas características físico-químicas similares a las de los combustibles convencionales derivados del petróleo.

Los tipos de biocombustibles líquidos para el transporte, engloban en la actualidad dos tipos de productos: El bioetanol y sus derivados, para sustituir parcial o totalmente a las gasolinas o a los aditivos que se utilizan en los motores de explosión para aumentar el índice de octano; y el biodiésel como sustituto del gasóleo (fracción destilada del petróleo crudo, que se purifica especialmente para eliminar el azufre) de automoción (también denominado biogasóleo o diéster), producido por transesterificación (reacción entre un éster y un alcohol) de aceites vegetales, naturales o usados (Fernández, 2008a).

El etanol se puede obtener a partir del petróleo o por vía biológica mediante procesos de fermentación. El alcohol etílico de origen vegetal (bioetanol) se obtiene por fermentación de mostos azucarados, que dan lugar a "vinos" de grado alcohólico variable (normalmente entre el 10 y el 15 %). Este alcohol se puede concentrar más tarde por destilación hasta la obtención del denominado "alcohol hidratado" (4-5 % de agua) o llegar hasta el alcohol absoluto tras un proceso específico de deshidratación.

La fabricación de biodiésel es un proceso sencillo y bien conocido desde el punto de vista técnico. Se parte de un aceite vegetal, que se somete a un proceso llamado de transesterificación, en el que se hidrolizan los enlaces éster de los triglicéridos y se obtienen nuevos ésteres con los ácidos grasos liberados en la hidrólisis y un alcohol sencillo que se utiliza como reactivo (normalmente metanol o etanol). El proceso se realiza a una temperatura moderada (alrededor de 60°C) en presencia de un catalizador (por lo general sosa o potasa) y como subproducto se obtiene glicerol, que tiene infinidad de aplicaciones en los sectores agrario, industrial, de la medicina, los cosméticos y la alimentación. A partir de 1,000 kg de aceite, 156 kg de metanol y 9.2 kg de potasa se puede obtener 965 kg de biodiésel y 178 kg de glicerina (sin refinar) con una recuperación de 23 kg de metanol (Fernández, 2008 b).

2.2.4.3 BIOCMBUSTIBLES GASEOSOS

Entre los biocombustibles gaseosos que se pueden obtener a partir de la biomasa están el gas de gasógeno, el biogás y el hidrógeno. El gasógeno se produce al someter la biomasa o pedazos de carbón vegetal y la brea resultantes de la pirólisis a altas temperaturas entre 800 y 1,500°C en ausencia de oxígeno, se originan productos gaseosos, con un poder calorífico bajo de 1,000 a 1,200 Kcal/m³ consistentes, principalmente, en N₂, CO, H₂, CH₄ y CO₂ en proporciones variables. Este proceso se realiza en los llamados gasógenos, que se utilizan con fines térmicos o, en combinación con motores, para producir energía mecánica o eléctrica. En principio, el destino del gas de gasógeno suele ser la producción de calor por combustión directa en un quemador o la generación de electricidad por medio de un motor o turbina.

El biogás se produce por la digestión de la biomasa, su producción aproximada es de unos 300 l por kg de materia seca, con un valor calórico de unos 5,500 kcal/m³. La composición de biogás es variable, pero está formado principalmente por CH₄ (55-65%) y CO₂ (35-45%); y, en menor proporción, por nitrógeno, (0-3%), hidrógeno (0-1%), oxígeno (0-1%) y sulfuro de hidrógeno (trazas). El poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano (9,500 Kcal /m³), pudiéndose aumentar ésta, eliminando todo o parte del CO₂ que le acompaña. Este tipo de transformación se produce de manera espontánea en pantanos o fondos de lagunas y lagos en los que haya depósitos de materia orgánica. Por este motivo al metano se le ha llamado el “gas de

los pantanos”. También se produce en los vertederos de RSU, pudiéndose obtener el gas mediante perforaciones.

El biogás se suele utilizar para generar electricidad. En el caso de los vertederos, su uso para este fin tiene como ventajas añadidas la quema del metano y su transformación en CO₂ y agua. De esta forma se reduce el efecto perjudicial del metano como gas de efecto invernadero (su potencial de absorción de la radiación infrarroja es muy superior al del CO₂). La digestión es un proceso típico de depuración, por lo que también se emplea para el tratamiento de aguas residuales y efluentes orgánicos de industrias agrarias o de explotaciones ganaderas.

El hidrógeno se considera actualmente como un “vector energético” de enorme potencial. Su combustión produce agua y una gran cantidad de energía (27 kcal/g), por lo que resulta idóneo para múltiples aplicaciones en la industria, el transporte y el hogar. La obtención del hidrógeno a partir de compuestos orgánicos hidrogenados, tales como hidrocarburos o alcoholes, se realiza mediante un proceso denominado “reformado”. Consiste en romper las moléculas orgánicas en sus componentes elementales (carbono e hidrógeno y eventualmente oxígeno) mediante reacciones con vapor de agua en presencia de un catalizador. Entre las moléculas orgánicas con posibilidad de ser la vía limpia de obtención de hidrógeno destaca el bioetanol, que se puede obtener a gran escala a partir de biomásas alcoholígenas (Fernández, 2008a).

2.3 DIGESTIÓN

Es el método utilizado para descomponer materia orgánica bajo condiciones controladas con producción de gas metano. Éste consiste, en lo esencial, en llenar un recipiente cerrado (el digestor) con el material orgánico, dejándolo dentro durante un periodo de semanas o meses, a lo largo de los cuales, dadas unas condiciones ambientales y químicas favorables, el proceso biológico pertinente tendrá lugar. Como la descomposición anaerobia solo puede producirse en ausencia de oxígeno, habrá un periodo inicial de descomposición en que tendrá lugar un proceso aerobio y se utilizará todo el oxígeno disponible, produciendo CO₂. A partir de ese momento comenzará el proceso anaerobio propiamente dicho (Steadman, 1978).

Existen dos etapas o fases de descomposición, caracterizadas por diferentes tipos de bacterias, que generalmente se suceden una a la otra pero que pueden estarse produciendo

simultáneamente en diferentes partes del recipiente: Una fase de fermentación y, una fase de metanogénesis. Al empezar el proceso de descomposición dentro de un reactor nuevo es necesario inocular con una mezcla inicial de una pequeña cantidad de estiércol fresco o de lodos de que flota en las alcantarillas, para que estén presentes las bacterias necesarias. Una vez que se ha iniciado el proceso, cada lote inocula al siguiente, y el material de un recipiente al siguiente. Si no están presentes las bacterias responsables de la producción del gas metano, el resultado sería simplemente la fermentación de todo el material descompuesto (Steadman, 1978).

En la primera fase, la licuefacción, las grandes moléculas orgánicas (grasas, proteínas, almidones) se descomponen en sustancias más sencillas, azúcares, alcohol, glicéridos péptidos y amino ácidos. Uno de los productos orgánicos ácidos principales en esta primera fase es el ácido acético. En la segunda, la fase de gasificación, actúa una segunda población de bacterias que convierten los ácidos orgánicos en gas metano. Las bacterias productoras de metano se multiplican menos rápidamente que las que producen la licuefacción, y son más sensibles a las variaciones del medio ambiente dentro del recipiente de descomposición o digestor (Steadman, 1978).

Otros autores dividen el proceso de la digestión en tres procesos degenerativos:

a) Hidrólisis enzimática, en que los sólidos fermentables como hidratos de carbono, lípidos y proteínas, son convertidos en compuestos solubles como, ácidos grasos de cadena larga, azúcares, alcoholes, etc (Concheiro y Rodríguez, 1985; Castells, 2005).

b) Acidulación o acidogénesis, en esta etapa los compuestos solubles (azúcares), se convierten en ácidos orgánicos volátiles (ácidos grasos de cadena corta), como el acético, butírico y el propiónico. Asimismo, se produce hidrógeno y dióxido de carbono, siendo todos los compuestos anteriores utilizados como alimento para las bacterias metanogénicas en la siguiente etapa (Concheiro y Rodríguez, 1985; Jarabo y Elortegui, 2000).

c) Metanación o metanogénesis, esta etapa implica la degradación de las sustancias producidas en etapas anteriores (como ácidos orgánicos volátiles) a metano y dióxido de carbono, por parte de un grupo de bacterias estrictamente anaerobias, denominadas metanogénicas. La magnitud de su población condiciona fuertemente la producción del metano, ya que su velocidad de reproducción es muy baja y necesita unas condiciones del medio muy propicias, las cuales se abordarán más adelante (Concheiro y Rodríguez, 1985; Jarabo y Elortegui, 2000).

Las bacterias productoras de gas metano, llamadas por ello metanogénicas, se encuentran entre los organismos más estrictamente anaerobios que se conocen e incluyen los siguientes géneros: *Metanococcus*, *Metanobacterium*, *Metanosarcina*, *Metanospirillum* y *Metanobacillus*. Usualmente no son móviles crecen con lentitud (en tres días) y se encuentran en forma natural en estiércol, pantanos y aguas negras (Concheiro y Rodríguez, 1985).

2.3.1 DISEÑO DE UN DIGESTOR

Para desarrollar tecnología comercial y económicamente atractiva, para la digestión de biomasa, es necesario homogeneizar las propiedades físicas y químicas de la materia prima, con las consideraciones de diseño y las cualidades técnicas del proceso. La selección de las propiedades de diseño del digestor, para una materia prima en particular, es una clave elemental para el desarrollo apropiado del proceso. Por tanto el entendimiento de los principios de operación de la mayoría de los tipos de digestores puede ayudar a seleccionar un esquema de proceso y a reducir las posibilidades de un desarrollo largo y complicado.

La relativa importancia de ciertos parámetros técnicos, para la alta producción y velocidad de metano depende de la materia prima y de los costos del reactor para el costo final del uso del biogás.

2.3.1.1 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)

El tiempo de retención hidráulica en un digestor está determinado por el cálculo del número de días requeridos para desplazar un volumen en el reactor. Cuando se utilizan alimentaciones sin diluir, el TRH en el digestor a cierta velocidad de carga, está en función del contenido de agua de la biomasa. Como el TRH puede disminuirse al realizar alimentaciones con bajo contenido de sólidos, con alta velocidad de carga, o aplicando ambos, esto puede ocasionar que un gran número de las bacterias responsables del proceso de digestión, sean lavadas hacia afuera del sistema. A no ser que alguna parte del efluente sea retenida en el reactor, para mantener cierta medida de sólidos y organismos en el sistema, la eficiencia de conversión disminuirá, la producción de metano bajará y probablemente ocurrirá una inestabilidad grande en el digestor. Las bacterias metanogénicas de lento crecimiento, serán lavadas o arrastradas fuera del digestor más

rápidamente que las de crecimiento acelerado, mientras que las bacterias responsables de producir ácidos causan un desbalance microbiológico, acumulación de grandes niveles de ácidos volátiles y una eventual desestabilización del sistema.

Discusiones acerca de digestores convencionales han destacado la importancia del TRH, ya que se considera que es similar al TRS (Tiempo de Retención de Sólidos) que determina el tamaño del digestor. Sin embargo, en los reactores que promueven la retención de sólidos y microorganismos, el TRS no es un parámetro muy usado para definir la operación del digestor. En términos de operación de digestores a gran escala, el problema crítico es para determinar la cantidad de alimentación que puede ser agregada al digestor por unidad de tiempo, no la cantidad de agua que es retenida por día. La operación del digestor depende en mayor medida del TRS que del TRH.

La forma de calcular el TRH es mostrada a continuación en la ecuación 2.7.

$$TRH = \frac{V}{Q} \dots\dots\dots 2.7$$

Donde

TRH: Tiempo de retención hidráulica en días.

V: Volumen del reactor en m³

Q: Gasto en m³/día

2.3.1.2 TAMAÑO DEL DIGESTOR Y DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS

Para decidir el tamaño correcto y el diseño apropiado para una planta generadora de biogás, deben considerarse cuidadosamente algunos puntos, además es necesario tener datos correctos sobre los cuales basar el diseño y tamaño.

Para especificar el tamaño de una planta debe determinarse:

1. Tamaño del digestor

2. Tamaño del colector de gas

3. Tamaño de la tubería para gas

El tamaño de cada uno de éstos depende de factores diferentes e independientes entre sí. El tamaño del digestor debe ser capaz de permitir el manejo adecuado de la cantidad de materia prima suministrada procurando que no sea menor de lo requerido para evitar que el digestor trabaje sobrecargado de materia orgánica, lo cual afecta la producción de gas, disminuyendo gradualmente hasta frenarse por completo. Además una sobrecarga en el digestor causa abundante espuma sobre la superficie del material, producida por materia semidigerida. En caso de que el digestor se opere muy abajo de la capacidad para la cual fue diseñado, presentará una constante y considerable pérdida de nitrógeno.

Por otra parte, el empleo de un digestor más grande del necesario resulta ante todo costoso en su construcción, y debe recordarse que todo aumento excesivo del costo hace la planta incosteable.

La ecuación siguiente puede utilizarse para determinar el tamaño o volumen del digestor.

$$VD = (D + CS) * \frac{TRH}{365} \dots\dots\dots 2.8$$

Donde:

VD: Volumen del digestor (m³)

D: Desecho (m³/año)

CS: Co-sustrato (m³/año)

TRH: Tiempo de retención hidráulica (días)

365 (días)

La ecuación siguiente puede utilizarse para determinar el diámetro del digestor:

$$D(m) = 2 * \sqrt{\frac{V}{A * 3.1416}} \dots\dots\dots 2.9$$

Donde

V=Volumen del digestor en (m³)

A = Altura del digestor (m)

La recolección del biogás, o su almacenamiento puede efectuarse de dos formas diferentes: La primera, mediante el domo colector instalado en el digestor, en cuyo caso el colector de gas debe diseñarse con capacidad suficiente para recibir por lo menos el 50% de la producción diaria de gas. La segunda manera es mediante la construcción de un tanque almacén separado del digestor. Debe instalarse una tubería adecuada para llevar el biogás desde el digestor hasta el tanque de almacenamiento en un caso, o bien hasta el lugar de consumo cuando no se considera su almacenamiento. La tubería poseerá el diámetro conveniente para evitar en lo posible, las caídas de presión.

La ecuación siguiente puede utilizarse para determinar el tamaño o volumen del tanque de almacenamiento del biogás.

$$VG=PG *20\%.....2.10$$

Donde:

VG= Volumen del tanque de almacenamiento de biogás en m³

PG= Producción diaria de biogás en $\frac{m^3}{día}$

2.3.1.3 SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO

Para lograr que el sistema tenga un sistema de seguridad adecuada se debe saber que, el biogás puede causar explosiones provocadas por el metano, su componente principal, el cual tiene los siguientes niveles de explosión (proporción en volumen con aire).

Nivel bajo de explosión 5.4%

Nivel alto de explosión 13.9%

Tomando en cuenta que en la composición del biogás, el metano está entre 60 y 70%, los niveles de explosión se elevan a:

Nivel bajo de explosión 9.0%

Nivel alto de explosión 23.0%

En estas condiciones, el biogás necesita una temperatura entre 650 y 750 °C para inflamarse o explotar, la cual puede ser alcanzada al encender un fósforo o al producir chispas por choques metálicos.

La densidad y su composición son también factores importantes en la seguridad, pues tomando en cuenta que la densidad del aire es de 1.293 g/l, la del metano 0.27 g/l y la del bióxido de carbono 1.98 g/l; y considerando una composición entre 30 y 40% de CO₂, la densidad del biogás llega a 1.09 g/l lo que lo hace más ligero que el aire y puede diluirse fácilmente, perdiendo peligrosidad. Si la proporción de CO₂ rebasa 45.7%, el biogás se vuelve más denso que el aire subiendo su límite de peligrosidad por varios factores:

-El biogás puede ser asfixiante cuando hace que el oxígeno del aire baje a 17.3%, y si llega a 13% es positivamente sofocante;

-Si en la composición del biogás se tiene CO en proporción de 0.1%, es fatal en 4 h y si la proporción de H₂ S es de 0.6% es fatal en menos de media hora.

Por todas estas razones hay que tener precauciones similares a las que se tienen con el gas doméstico (butano-bajo propano):

-Al llenar tanques de biogás, éstas deben estar libres de oxígeno al igual que las líneas de transporte de biogás;

-Se deben realizar pruebas de fugas con agua jabonosa;

-Cuidar que no haya flamas, brasas, cigarrillos encendidos o calzado con clavos capaces de producir chispas en las áreas de compresión y carga;

-Los locales donde se maneje biogás deben ser de preferencia altos y ventilados;

-Los extinguidores deben ser de CO₂ y polvo ABC.

En cuanto al tema de mantenimiento se puede decir que es esencial que todos los componentes del sistema estén libres de fugas de biogás para eliminar pérdidas del mismo, y acumulación de biogás combustible en áreas confinadas, por motivos de seguridad, así como la entrada de aire al sistema lo que inhibe el proceso. Por lo tanto, se deberán efectuar inspecciones rutinarias por lo menos una vez por semana, para asegurar que no se presente este tipo de fallas, y permitir su corrección en el momento de ser detectadas.

En las ocasiones en que se vacía el digestor, se deberá efectuar una inspección cuidadosa del interior del mismo para detectar y corregir problemas de construcción que pudieran haberse presentado. Se deberá también aplicar un recubrimiento a base de pintura anticorrosiva a todas las partes metálicas internas del sistema, así como a las tuberías y conexiones en constante contacto con el biogás.

En digestores tipo hindú con campana metálica, es recomendable quitar ésta por lo menos una vez al año, para pintarla como se ha mencionado, y al mismo tiempo extraer las "natas" que se han formado en la superficie de la fase líquida.

2.3.2 TIPOS DE DIGESTORES

Existen diversos tipos de digestores tipo anaerobio:

2.3.2.1 DIGESTORES DE UNA ETAPA

En este tipo de digestores el proceso se realiza en un solo lugar o reactor, e incluyen:

a. Lagos de estabilización: Rellenos sanitarios y fosas sépticas que generalmente son empleados para resolver problemas de tipo sanitario y no con propósitos energéticos.

b. Digestores convencionales: Son tanques para desechos en los que tiene lugar la estabilización biológica y la separación sólido- líquido. Los tiempos de retención son grandes de 15 a 30 días para líquidos y de 40 a 60 para sólidos; operan a bajas velocidades de carga; existen dos diseños básicos: El hindú y el chino; en el primero los domos son flotantes y las paredes y el fondo planos;

en el segundo el domo está fijo, no tiene paredes separadoras en el fondo del digestor, sus paredes y fondo son cóncavos.

c. Digestores tipo bolsa: Son originados en Taiwán, están contruidos totalmente con materiales plásticos, son compactos y ligeros, de fácil ensamble y operación, con geometría cilíndrica e instalados con el eje en posición horizontal.

d. Digestores de alto rendimiento: Incluyen un mecanismo para agitar la mezcla (para un mayor contacto entre bacterias y sustrato) y algún medio de calentamiento para asegurar una temperatura estable optima para la reacción; tiene tiempos de retención menores que los convencionales (Concheiro y Rodríguez, 1985).

2.3.2.2 DIGESTORES DE DOS ETAPAS

Consisten en un primer digestor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, seguido de un digestor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Si la primera etapa consiste en un digestor discontinuo, el liquido tratado en la segunda es el obtenido por precolación en la primera una vez recirculado el efluente de la segunda. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo digestor. Ha sido aplicado con éxito para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: Frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, excremento de ganado vacuno, etcétera (Castells, 2005).

2.3.2.3 DIGESTORES DE DOS FASES

Están formados por dos digestores de alto rendimiento conectados en serie, uno para la fase de acidogénesis (producción de ácido) y otro para la fase de metanogénesis (producción de metano). Su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único digestor convencional. La separación de los dos tipos de bacterias se logra agregando inhibidores tales como oxígeno, nitratos, sulfatos, metales pesados, etcétera, con envenenamiento potencial, que aporta un control cinético que consiste en controlar el tiempo de retención de cada digestor, el cual será inferior en el primero, debido a las altas tasas de

crecimiento de las bacterias acidogénicas, o mediante diálisis (proceso de difusión selectiva a través de una membrana que permite el paso de ciertos cuerpos y evita el de otros) (Castells, 2005; Concheiro y Rodríguez, 1985).

2.3.2.4 DIGESTORES DE CONTACTO ANAEROBIO

a. Con recirculación de sólidos: Una fracción de los sólidos que llegan al segundo tanque de un digestor de dos etapas se recirculan hacia el primero. Así se reduce el volumen requerido en el segundo (el tiempo de retención de líquidos es menor que el de los sólidos).

b. Biomix (Biomechanics Ltd.): Consiste en una bomba tipo termosifón para mezclar el digestor y controlar la formación de nata, y un cambiador de calor para elevar la temperatura a 35° C. Cuenta con un enfriador-separador por gravedad que separa los sólidos por choque térmico y una sedimentación posterior. El líquido reduce su temperatura de 35 a 25°C en el enfriador en 30 segundos, cortando temporalmente la actividad microbiana y la producción de biogás (Concheiro y Rodríguez, 1985).

2.3.2.5 DIGESTORES DE PELÍCULA ADHERIDA O FILTRO ANAEROBIO

Este digestor consta de una capa de piedras o arena a la que se adhieren los microorganismos, aumentándose con ello la zona de actividad biológica: Los tiempos de retención son pequeños y la eliminación de sólidos suspendidos alta por lo que pueden presentar problemas de taponamiento (Concheiro y Rodríguez, 1985). Este sistema ha estado extensamente aplicado para el tratamiento de aguas residuales de industria agroalimentaria, y para residuos ganaderos (Castells, 2005).

2.3.2.6 DIGESTORES DE FLUJO PISTÓN

También son conocidos como canales fermentadores, estos consisten en un tubo o tanque estrecho, largo, alimentado por un extremo. Los desechos avanzan hacia el otro extremo por gravedad; usualmente se aplican a desechos con alto contenido de sólidos, los tiempos de retención son largos de 30 a 50 días (Concheiro y Rodríguez, 1985).

El hecho de que la tasa de crecimiento de microorganismos sea más elevada a la entrada del digestor, donde la concentración del sustrato también es elevada, hace que la concentración media en el digestor sea superior a la correspondiente a la de un digestor convencional, o en todo caso superior a la de salida, con lo cual el tiempo de retención será inferior. Este tipo de digestor ha sido aplicado a diferentes tipos de residuos orgánicos, como a los residuos orgánicos urbanos, excremento porcino y bovino. Una de las dificultades que presenta es la falta de homogenización en la sección transversal a la dirección del flujo, lo cual se puede evitar mediante un sistema de agitación transversal (Castells, 2005).

2.3.2.7 DIGESTOR DE LECHO DE LODO

En este sistema se favorece la floculación o agregación de bacterias entre ellas, formando gránulos, de forma que por sedimentación se mantienen en el interior del reactor, con la velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre que en la parte superior exista un buen separador sólido (biomasa) - líquido/biogás. El diseño más común es el reactor anaerobio de de lodos de flujo ascendente (Upflow Anaerobic Sludge Blanket UASB por sus siglas en inglés), el cual está siendo extensamente aplicado al tratamiento de aguas residuales de la industria alimentaria (Castells, 2005).

2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS DIGESTORES SEGÚN EL TIPO DE ALIMENTACIÓN

2.3.3.1 DIGESTOR DE LLENADO INTERMITENTE

El tipo de digestor más sencillo es simplemente un contenedor cerrado, que puede ser un bote, tanque, o un hoyo en el suelo, que se carga con el material para descomposición. El recipiente a continuación se cierra herméticamente para que no le entre aire. Hay que encontrar algún medio para recoger el gas que se produce; la forma más sencilla es dejar flotar un recipiente invertido sobre la mezcla de descomposición, que se elevará a medida que se llene de gas: Este puede luego extraerse por medio de un grifo o un tubo. Aunque son muy sencillos y necesitan poca atención una vez que ha empezado el proceso de descomposición, este tipo de digestores de llenado intermitente tiene algunos inconvenientes.

Hace falta mucho trabajo para cargarlo y para retirar el lodo una vez terminada la descomposición. Durante las semanas que tiene lugar la descomposición cambia el ritmo de producción de gas, alcanzando el máximo al cabo de unos diez días y reduciéndose luego a un nivel menor que puede mantenerse durante dos o tres meses más. Para asegurar un nivel continuo y constante de producción de gas en este tipo de recipientes, es necesario tener por lo menos dos unidades, y lo ideal serían cinco o seis funcionando simultáneamente pero en diferentes etapas cada uno, para que mientras uno se vacía y se vuelve a llenar, otro esté produciendo al máximo (Steadman, 1978).

En cuanto al tiempo de retención de los desechos de este tipo de digestores, se recomienda reducirlo, calentando y/o agitando el digestor.

2.3.3.2 DIGESTOR DE LLENADO CONTINUO

Este digestor se rellena continuamente con pequeñas cantidades de alimentación al tiempo que el lodo final se saca ininterrumpidamente por el otro extremo del recipiente. Éste puede tener la forma de un contenedor vertical único, con tuberías por las que se introduciría el material nuevo y se extraería el lodo final. En ocasiones puede haber el inconveniente de que se extraiga antes de tiempo materia no totalmente descompuesta, de que la descomposición no sea equilibrada o de que se produzcan remolinos dentro del material en descomposición que impidan también un proceso continuo y equilibrado. Se ha adoptado un mecanismo que evita en parte estos problemas, consistente en dividir el recipiente en dos cámaras por medio de un muro central, de modo que la descomposición preliminar se produzca en uno de los lados, y se pase luego al otro. Así quedan separadas las dos etapas de descomposición, y el material nuevo se introduce sólo por un lado, y el lodo final se extrae sólo del otro (Steadman, 1978).

2.3.4 FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN

Los factores más importantes que condicionan el éxito del proceso de descomposición son la temperatura, el pH y la composición química de los materiales empleados, sobre todo la proporción de sólidos-líquidos y de nitrógeno-carbono presentes (Steadman, 1978).

2.3.4.1 PROPORCIÓN DE CARBONO-NITRÓGENO

Las bacterias que intervienen en el proceso de descomposición consumen carbono 30 a 35 veces más rápidamente que nitrógeno (Steadman, 1978). Por lo tanto, la relación proporcional de ambas sustancias debe ser alrededor de 20:1 a 30:1 en la materia prima (Concheiro y Rodríguez, 1985). Si hay demasiado carbono, el proceso es más lento. Si por lo contrario, existe nitrógeno en exceso, en el proceso este se perderá en forma gaseosa (como amoníaco, NH_3), que reduce en gran medida el valor nutritivo del efluente final (Steadman, 1978).

2.3.4.2 TEMPERATURA

Dentro de un margen bastante amplio de temperaturas, siempre se producirá cierta descomposición de 0°C hasta 69°C, pero el ritmo de descomposición y de producción de biogás es bastante sensible a la temperatura y por lo general el proceso es más rápido a mayor temperatura. Por debajo de los 15°C el proceso prácticamente se detiene. Hay dos intervalos de temperatura dentro de los cuales, la descomposición se desarrolla en las mejores condiciones: Desde los 30°C hasta los 40°C y desde los 50°C hasta los 60°C. En este último intervalo de temperaturas actúa una serie distinta de bacterias, las “termofílicas”, pero éstas son muy sensibles a los cambios ambientales, y su acción resulta en la formación de un lodo de bajo valor fertilizante. Por lo general parece más conveniente que el proceso se realice a unos 32-35°C (Steadman, 1978).

Según las temperaturas a las que ocurren, los procesos de digestión pueden clasificarse de la forma que indica la Tabla 2.10.

2.3.4.3 ACIDEZ Y ALCALINIDAD

En lo que respecta al pH, una acidez excesiva impide la descomposición y lo mejor es mantener el pH entre los 7.5 y los 8.5, es decir un poco por encima del neutro (7). Durante las primeras fases de descomposición, cuando se produce mucho CO_2 , formando ácido carbónico en solución, y más tarde cuando se producen los ácidos orgánicos, el pH puede descender a 6 ó menos. Pero como estos ácidos se consumen al producirse el metano, el pH aumenta de nuevo, y la mezcla se hace menos sensible al ácido o álcali adicional. Es decir se auto-equilibra o amortigua. En la fase inicial

la mezcla es propensa a convertirse en excesivamente ácida si se agrega con demasiada rapidez la alimentación, y si esto ocurre debe frenarse el ritmo. Si el pH es demasiado alto a causa de la alcalinidad excesiva de la materia prima, poco más se puede hacer que esperar que el CO₂ producido reduzca poco a poco el grado de acidez (Steadman, 1978).

Tabla 2. 11 Clasificación de los procesos de digestión, en base a la temperatura a la que ocurren.

PROCESO	RANGO DE TEMPERATURA EN EL QUE OCURRE	REFERENCIA
Sicrofílicos	10 - 25°C	(Bailie, 1979)
Mesofílicos	32 - 45°C	(Concheiro y Rodríguez, 1985)
	20 - 40°C	(Braunstein, 1981)
	30 - 37°C	(Bailie, 1979)
	30 - 40°C	(Steadman, 1978)
	5 - 40°C	(Jarabo y Elortegui, 2000).
Termofílicos	45 - 50°C	(Concheiro y Rodríguez, 1985)
	45 - 65°C	(Braunstein, 1981)
	55 - 60°C	(Bailie, 1979)
	50 - 60°C	(Steadman, 1978)
	40 - 65°C	(Jarabo y Elortegui, 2000).

2.3.4.4 RELACIÓN PROPORCIONAL DE SÓLIDOS A LÍQUIDOS

El porcentaje de sólidos recomendable en cualquier mezcla en descomposición está entre el 7 y el 9%. Es una proporción algo mayor que la habitual en los productos de alcantarillado de cualquier ciudad (5% de sólidos) que van muy diluidos en el agua de desagüe. Pero es menor que la proporción de materia sólida en el estiércol animal y en los desperdicios vegetales (18% de materia sólida en las heces frescas de vaca y de un 30 a 40% en desperdicios vegetales), que deberán mezclarse con agua en cantidad apropiada antes de arrojarse en los recipientes para su descomposición. La “materia sólida” a que nos estamos refiriendo incluye solo la materia orgánica sólida “volátil” que puede descomponerse, y se calcula por su peso en seco (Steadman, 1978).

2.3.4.5 PREPARACIÓN Y MEZCLA DE LOS MATERIALES

Conviene tener un depósito separado para hacer la mezcla previa de los materiales, ya que en la mayoría de los casos será necesario diluirlos un poco en agua. La materia vegetal, sobre todo para los digestores de funcionamiento continuo, también deberá cortarse en trozos no mayores de 2-3 cm. Por regla general, cuanto menores sean los trozos, más rápida será la descomposición. En los residuos vegetales suele haber bastante cantidad de material leñoso.

2.3.4.6 AGITACIÓN Y MEZCLADO

Hay diferentes razones para mantener un cierto grado de agitación en el medio en digestión:

- a. Mezclado y homogenizado del sustrato de alimentación con el sustrato en digestión
- b. Distribución uniforme de calor para mantener una isoterma suficientemente correcta
- c. Evita la formación de espumas o la sedimentación
- d. Favorecer la transferencia de gases, que pueden ser atrapados en forma de burbujas en el sustrato

La agitación puede ser mecánica o neumática (burbujeo de gas recirculado a la presión adecuada). En todo caso nunca debe ser violenta ya que podría destruir los flóculos o agregados de bacterias, necesarios para mantener un proceso estable (Castells, 2005).

2.3.4.7 TIEMPO DE RETENCIÓN

El tiempo de retención es el tiempo durante el cual los sustratos están dentro del digestor. El tiempo de retención requerido para la producción óptima del biogás depende de la temperatura. Para la gama de temperaturas psicrófila se requiere un tiempo de retención de 40-100 días, para la gama mesófila 25-40 días, y para la gama termófila se requieren de 15-25 días.

2.3.5 DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN BAJA CONCENTRACIÓN

La digestión de sólidos en baja concentración es un proceso biológico en el cual se fermentan los residuos orgánicos en concentraciones de sólidos iguales que el 4-8 %. Este proceso se usa para producir gas metano a partir de residuos humanos, animales, agrícolas y a partir de los RUO. Una de las desventajas del proceso de digestión de sólidos en baja concentración, tal como se aplica a los residuos sólidos, es que se deben añadir considerables cantidades de agua a los residuos para que el contenido en sólidos llegue al rango requerido. La adición de agua produce un lodo digerido muy diluido, que hay que deshidratar antes de su evacuación (Tchobanoglous y col., 1994 b).

2.3.5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Hay dos pasos básicos implicados cuando se utiliza el proceso de digestión de sólidos en baja concentración para producir metano a partir de los RUO. El primer paso implica la adición de humedad y de nutrientes, la mezcla, el ajuste de pH hasta aproximadamente 6.8, y el calentamiento de la masa húmeda entre 55 y 60° C. La digestión se lleva a cabo dentro de un digestor de flujo continuo cuyo contenido se mezcla completamente. En la mayoría de las operaciones el contenido de humedad y los nutrientes requeridos se añaden a los residuos que se van a procesar, en forma de fangos de aguas residuales o de estiércol, quizás también tengan que añadirse nutrientes adicionales. Como la formación de espuma y de cortezas ha causado problemas en la digestión de los RUO, una mezcla adecuada es de una importancia fundamental en el diseño y funcionamiento de los digestores.

El segundo paso del proceso implica la captura, almacenamiento y, si es necesario, la separación de los componentes gaseosos. Otra tarea que hay que llevar a cabo es la deshidratación de los lodos digeridos y producidos por la digestión. Por lo general, el procesamiento del lodo digerido producido por la digestión, es un proceso muy caro que raras veces se utiliza (Tchobanoglous y col., 1994 b).

2.3.5.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL PROCESO

Aunque el proceso de digestión de los RUO no se ha desarrollado completamente, en la Tabla 2.12 se resumen algunas de las consideraciones de diseño más importantes para el proceso de digestión de sólidos en bajas concentraciones.

2.3.6 DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN ALTA CONCENTRACIÓN

La digestión de sólidos en alta concentración es un proceso biológico en el que se produce la fermentación con un contenido de sólidos total de aproximadamente 22 % ó más. La digestión de sólidos en alta concentración es una tecnología relativamente nueva, y su aplicación para la recuperación de energía a partir de los RUO todavía no se ha desarrollado completamente (Cecchi y col., 1988; Chynoweth y col., 1990; Jewell, 1979; Wujcik y Jewell, 1980).

Dos ventajas importantes que tiene el proceso de digestión de sólidos en alta concentración son: Más bajos requisitos de agua y una tasa más alta de producción de biogás por unidad de volumen del tamaño del digester. La mayor desventaja de este proceso es que de momento (1992) hay una limitada experiencia disponible en el funcionamiento a escala real.

2.3.6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Los pasos descritos para la digestión de sólidos en baja concentración también se aplican en el proceso de digestión de sólidos en alta concentración. La diferencia más importante se produce en el final del proceso, cuando se requiere menos esfuerzo para deshidratar y evacuar los lodos digeridos.

2.3.6.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL PROCESO

Aunque el proceso de digestión de sólidos en alta concentración no se ha desarrollado completamente, en la Tabla 2.13 se resumen algunas importantes consideraciones de diseño.

2.3.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN BAJAS Y ALTAS CONCENTRACIONES PARA LOS RUO.

En la Tabla 2.14, 2.15, 2.16, se comparan las características operacionales de los procesos de digestión en baja y alta concentración.

2.3.8 PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN

2.3.8.1 BIOGÁS

Gas que se produce mediante la descomposición anaerobia, es una mezcla cuyo principal constituyente es el metano (CH_4), presente en una porción que varia aproximadamente entre el 54 y el 70%. El siguiente componente mayor es el CO_2 , que entra en una proporción del 27 al 45%; y en pequeñas cantidades, existe nitrógeno, hidrógeno, monóxido de carbono, y rastros de mercaptano y de ácido sulfhídrico. Estos últimos y especialmente el ácido sulfhídrico (H_2S) son los responsables del olor del gas (Steadman, 1978).

La composición o riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. En la Tabla 2.17 se muestran valores medios de composición del biogás en función del substrato utilizado (Castells, 2005).

Tabla 2. 12 Consideraciones importantes de diseño para la digestión de sólidos en bajas concentraciones de los RUO (Tchobanoglous y col., 1994 b).

COMPONENTE DE RESIDUOS	OBSERVACIONES
Tamaño del material	Los residuos que se van a digerir deben triturarse hasta un tamaño que no interfiera en el funcionamiento eficaz de las operaciones de bombeo y mezcla.
Equipamiento de mezclado	Para lograr resultados óptimos, para mantener homogeneidad en la temperatura y para evitar la acumulación de capas de impurezas, se recomienda un mezclado mecánico.
Porcentaje de residuos sólidos mezclados aguas residuales.	Aunque se han utilizado unas cantidades de residuos que varían desde el 50 al 90%, el 60% parece ser una proporción razonable.
Tiempo medio de retención hidráulica	El tiempo mínimo esta en el rango de tres a cuatro días. Utilizar de 10 a 20 días para el diseño, o basar el diseño en resultados de estudios piloto.
Tasa de carga	De 0.6 a 1.6 kg/m ³ día. Actualmente no está bien definido. Se ha informado de tasa significativamente más altas.
Concentración de sólidos	Igual o menor que del 8-10 % (del 4-8 %, típico).
Temperatura	De 30 a 38°C para un reactor mesofílico y entre 55 y 60°C para un reactor termofílico.
Destrucción de residuos sólidos volátiles	Depende de la naturaleza de las características de de los residuos. Varía aproximadamente desde el 60 al 80 %; el 70 % puede utilizarse para propósitos de estimación.
Sólidos totales destruidos	Varía desde el 40 al 60 %, según la cantidad de material inerte originalmente presente.
Producción de gas	De 0.5 a 0.75 m ³ /kg de sólidos volátiles destruidos, CH ₄ =55 %, CO ₂ = 45 %

Tabla 2. 13 Consideraciones importantes de diseño para la digestión anaerobia de sólidos en altas concentraciones de los RUO (Tchobanoglous y col., 1994 b).

COMPONENTE DE RESIDUOS	OBSERVACIONES
Tamaño del material	Los residuos que se van a digerir deberán triturarse hasta un tamaño que no interfiera el funcionamiento eficaz de los mecanismos de alimentación y descarga.
Equipamiento de mezclado	El equipamiento de mezclado dependerá del tipo de reactor que se vaya a utilizar.
Porcentaje de residuos sólidos mezclados con lodos	Depende de las características de los lodos.
Tiempo de retención	Utilizar de 20 a 30 días para el diseño o basar el diseño en resultados de estudios piloto.
Tasa de carga basada en sólidos volátiles biodegradables (SVB).	De 6 a 7 kg/m ³ día. Actualmente no está bien definido. Se ha informado de tasas significativamente más altas.
Concentración de sólidos	Del 20 al 35 % y del 22 al 28 %, típico.
Temperatura	De 30 a 38 °C para un reactor mesofílico y en 55 y 60 °C para un reactor termofílico.
Destrucción de SVB	Varía aproximadamente desde el 90 al 98 % según el tiempo bruto de retención y la tasa de carga de SVB.
Sólidos totales destruidos	Varía según el contenido de lignina del sustrato.
Producción de gas	De 0.625 a 1.0 m ³ /kg de sólidos volátiles biodegradables destruidos. (CH ₄ = 50 %; CO ₂ = 50 %).

Tabla 2. 14 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 1).

PARÁMETRO DE DISEÑO Y/O OPERACIÓN	OBSERVACIONES	
	SÓLIDOS EN BAJAS CONCENTRACIONES	SÓLIDOS EN ALTAS CONCENTRACIONES
Diseño de reactor	Se han utilizado reactores de mezcla completa en sistemas a gran escala para los RUO. Se utilizan ampliamente los reactores de flujo pistón para otros materiales orgánicos, especialmente estiércol de vaca.	Se han estudiado experimentalmente reactores de mezcla completa, flujo pistón y de cargas discontinuas. Ninguno de estos tipos de reactores han sido utilizados comercialmente para el procesamiento de RUO.
Contenido de sólidos	Del 4 al 8 %	el 22 al 32 %
Volumen de reactor	Se requiere un gran volumen de reactor por volumen unitario de residuos orgánicos.	Se requiere un volumen de reactor mucho más pequeño para el mismo volumen de residuos orgánicos que en el proceso de digestión de sólidos en bajas concentraciones.
Adición de agua	Se requiere un gran volumen de agua para incrementar el contenido en humedad de los RUO.	El requisito de agua es mucho menor, por la alta concentración en sólidos.
Tasa de carga orgánica	Tasas de carga orgánica relativamente bajas por unidad de volumen de reactor	Tasas de carga orgánica relativamente altas por unidad de volumen de reactor.
Tasa de producción de gas	Se ha informado de tasas máximas de producción de gas de hasta 2 volúmenes por volumen activo de reactor	Se han logrado tasas máximas de producción de gas de hasta 6 volúmenes por volumen activo de reactor.

Tabla 2. 15 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 2).

PARÁMETRO DE DISEÑO Y/O OPERACIÓN	OBSERVACIONES	
	SÓLIDOS EN BAJAS CONCENTRACIONES	SÓLIDOS EN ALTAS CONCENTRACIONES
Tasa de sedimentación	La tasa de sedimentación es baja debido al alto contenido de agua.	Se puede lograr una tasa de sedimentación significativamente más alta en el mismo período de retención comparándola con la de la digestión de sólidos en bajas concentraciones.
Mecanismos para la alimentación y descarga de efluente	Se han utilizado bombas de todos los tipos.	Como ésta es una tecnología relativamente nueva, no están definidos los mecanismos para la alimentación y descarga de efluentes del reactor anaerobio. Se han utilizado transportadores en espirales y bombas para sólidos en altas concentraciones.
Problemas de toxicidad	Los problemas de toxicidad en un digester de sólidos en bajas concentraciones son menos severos debido a la naturaleza diluí-da de los materiales de residuos orgánicos.	La toxicidad de sales y metales pesados es más común en la digestión anaerobia de sólidos en altas concentraciones debido a las grandes concentraciones de estos compuestos y elementos químicos. La toxicidad del amoníaco es más problemática con relaciones C/N bajas menores de 10 a 15.

Tabla 2. 16 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 3).

PARÁMETRO DE DISEÑO Y/O OPERACIÓN	OBSERVACIONES	
	SÓLIDOS EN BAJAS CONCENTRACIONES	SÓLIDOS EN ALTAS CONCENTRACIONES
Problemas de lixiviados	Debido al alto contenido en agua, el efluente estabilizado puede generar un problema de lixiviados.	El efluente de un digestor de sólidos en altas concentraciones normal-mente contiene del 25 al 30 % de sólidos, lo que minimiza el potencial de generación de lixiviados.
Deshidratación de efluente	Se requieren instalaciones grandes y costosas para separar sólidos. Para la evacuación final debería tratarse también el agua separada.	Es adecuado un equipamiento de deshidratación barato.
Estado tecnológico	No comercializado para la recuperación de energía a partir de los RUO. La utilización comercial de digestores anaerobios de sólidos en bajas concentraciones para la producción de energía a partir de residuos agrícolas está muy extendida.	No comercializado para la recuperación de energía a partir de los RUO.

Tabla 2. 17 Componentes del biogás en función del sustrato utilizado (Castells, 2005).

COMPONENTE	RESIDUOS GANADEROS	RESIDUOS AGRÍCOLAS	FANGOS DE DEPURADORAS	RESIDUOS MUNICIPALES	GAS DE VERTEDERO
METANO	50-80 %	50-80 %	50-80 %	50-70 %	45-60 %
DIÓXIDO DE CARBONO	30-50 %	30-50 %	20-50 %	30-50 %	40-60 %
AGUA	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
HIDRÓGENO	0-2 %	0-2 %	0-5 %	0-2 %	0-0.2 %
SULFURO DE HIDRÓGENO	0-1 %	100-700 ppm	0-1 %	0-8 %	0-1 %
AMONIACO	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	0.1-1 %
MONÓXIDO DE CARBONO	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-0.2 %
NITRÓGENO	0-1 %	0-1 %	0-3 %	0-1 %	2-5 %
OXÍGENO	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0.1-1 %
CONSTITUYENTES EN CANTIDADES TRAZAS, COMPUESTOS ORGÁNICOS	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	0.01-0.6 % (*)

(*)Terpenos y esterres.

Biogás también se le denomina a los gases que se muestran en la Tabla 2.18.

Tabla 2. 18 Clasificación de biogás en base a la forma de producción (OECD/IEA, 2004).

TIPO DE BIOGÁS	FORMA DE PRODUCCIÓN
Gas de vertederos de basura	Digestión de los desechos orgánicos en vertederos de basura
Gas de lodo de aguas residuales	Fermentación anaerobia del lodo de aguas residuales
Otro biogás	Fermentación anaerobia de excremento animal, desechos de mataderos, cervecerías y otras industrias agroalimentarias

2.3. 8.1.1 VALOR DE COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS

El valor del gas como combustible depende del contenido de metano. El metano puro tiene mayor valor de combustión que el “gas-ciudad” normal, y el “biogás” puede tener un valor calorífico de unas 5,200 a 6,700 Kcal/m³. El gas butano y el gas propano tienen respectivamente 28,000 y 21,000 Kcal/m³ (Steadman, 1978).

El biogás es poco tóxico, ya que contiene poca cantidad de monóxido de carbono. Se quema con una llama violeta, y puede arder continuamente si la proporción de metano a aire es de 1:20 o menos.

2.3.8.1.2 ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS

Las variaciones de producción de gas en los digestores se amortiguan mediante depósitos de almacenamiento (gasómetros), que pueden ser de diversos tipos, y de baja, media o alta presión.

Gasómetros de baja presión: Entre los más utilizados están los de cúpula o campana flotante sobre depósito de agua, como el que muestra la en la Figura 2.6, que puede alcanzar volúmenes de almacenamiento importantes, aunque no suelen sobrepasar los 1500 m³. La presión normalmente no supera los 50 mbar. Otra opción también muy utilizada son los gasómetros hinchables, como el mostrado en la Figura 2.7 (Castells, 2005).

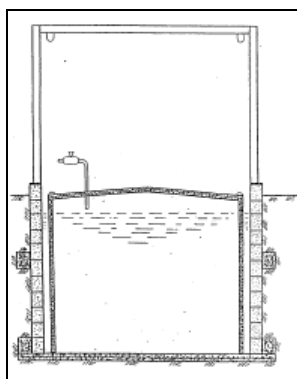


Figura 2. 6 Gasómetro de baja presión (Guevara, 1996).



Figura 2. 7 Gasómetro inchable

2.3.8.1.3 USO DEL BIOGÁS

El biogás generado en el proceso de digestión puede ser valorizado de diferentes formas, tal y como se muestra en la Figura 2.8. Los requerimientos de depuración variarán también en función del uso del gas, como se muestra en la Figura 2.9 (Castells, 2005).

2.3.8.1.4 TRATAMIENTO DEL BIOGÁS EN FUNCIÓN DE SU USO

La necesidad y tipo de tratamiento depende de la composición del biogás y del uso que se le vaya dar. El biogás suele contener ácido sulfhídrico que puede ser corrosivo si hay superficies metálicas. También puede contener hidrocarburos. El gas fluye de los digestores en forma saturada de vapor de agua, que también es perjudicial para las instalaciones y es necesario eliminarlo. En otros casos será preciso concentrar el gas, eliminando el CO₂, que puede suponer del 60 a 40% en volumen (Castells, 2005).

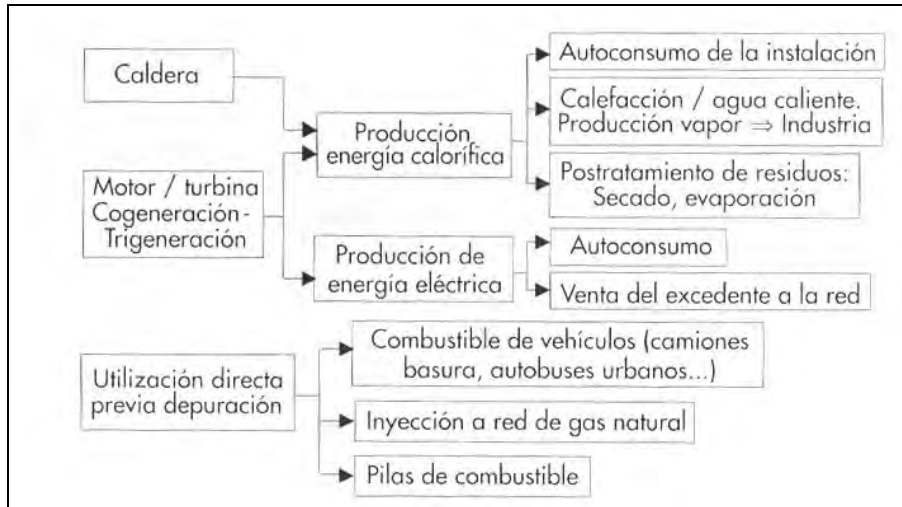


Figura 2. 8 Valoración del biogás (Castells, 2005).

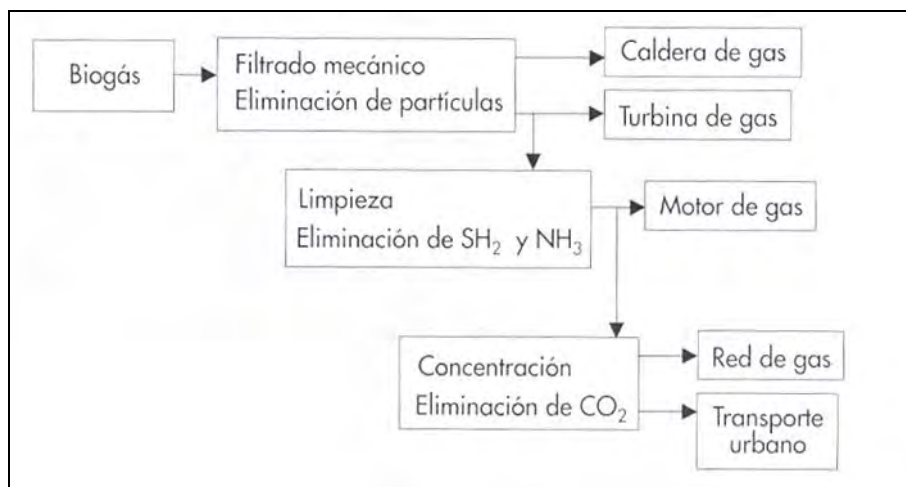


Figura 2. 9 Tratamientos de depuración del biogás de acuerdo a su uso (Castells, 2005).

2.3.8.1.4.1 ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS

Se trata de métodos sencillos que se basan en el uso de rejillas metálicas, trampas de agua o combinaciones de ambas (Castells, 2005).

2.3.8.1.4.2 DESHIDRATACIÓN CONDENSADORES

Este proceso se realiza debido a que el biogás normalmente se encuentra saturado de vapor de agua. La eliminación del agua se realiza mediante su condensación en trampas frías. Si la digestión se realiza a 35 °C, el biogás contiene aproximadamente 35 g H₂O/m³. La trampa fría o condensador aprovecha la diferencia de temperaturas entre el digester y la temperatura ambiente exterior para condensar el agua de forma natural. Un condensador consiste en un depósito cerrado en cuyo interior se disponen mamparas metálicas en cuya superficie se produce la condensación. La eficiencia aumenta si se incrementa la superficie de contacto. El efecto de condensación se puede reforzar mediante instalaciones frigoríficas. También se pueden utilizar absorbentes químicos como soluciones de glicol, etileno o trietileno (*Castells, 2005*).

2.3.8.1.4.3 ELIMINACIÓN DE H₂S

El ácido sulfhídrico es un compuesto altamente corrosivo por lo que su concentración debe reducirse por debajo de los niveles aceptables, para proteger las instalaciones de gas, motores, calderas y turbinas.

Durante el proceso de digestión, en el que se mantienen condiciones reductoras, en presencia de compuestos azufrados en el medio, se desarrollan bacterias sulfato-reductoras que producen H₂S, en proporciones que pueden llegar al 1 % en volumen. La eliminación de H₂S del biogás se consigue por diferentes métodos, que básicamente se basan en una oxidación a azufre elemental, sólido. Se puede eliminar usando gran variedad de absorbentes en medio líquido u oxidantes en fase sólida. Los métodos que utilizan absorbentes líquidos son preferiblemente usados si es necesario eliminar también CO₂ para alguna aplicación. Los métodos de eliminación en seco son en general mejores si no es necesario eliminar CO₂ y son más económicos, sobretodo en pequeñas instalaciones. Los principales métodos se relatan a continuación (*Castells, 2005*).

2.3.8.1.4.3.1 BIOLÓGICA

Se basan en la acción de unos organismos capaces de oxidar el sulfhídrico o los sulfuros a azufre elemental. La mayoría de los microorganismos utilizados pertenecen al género *Thiobacillus*. Debe

añadirse la cantidad estequiométricamente necesaria de oxígeno para oxidar todo el H₂S presente, que dependiendo de la concentración está entre un 2 y 6% de aire en el biogás. A estas concentraciones no se producen problemas de auto inflamación.

El método más simple consiste en la adición de aire/oxígeno al espacio de cabeza del digestor o en el desgasificador. Los *Thiobacilli* crecen en la superficie del licor mezclado del digestor, donde encuentran los nutrientes necesarios, formando una costra amarilla. En función de la temperatura y las condiciones de operación la eliminación puede ser superior al 95%, llegando a concentraciones menores de 50 ppm de H₂S. El mismo sistema puede realizarse en un tanque postdigestión o en un reactor biológico específico, permitiendo un mayor control del flujo de gases (Castells, 2005).

2.3.8.1.4.3.2 BIOFILTROS O BIOSCRUBBER

Este tratamiento combina una torre de lavado de gas y un tanque de aireación. El biogás es introducido en un bioscrubber y es lavado con licor de fangos activos que procede de un tanque de aireación. El lodo conteniendo los sulfuros se recircula al tanque de aireación dónde el sulfuro se oxida a sulfato mediante bacterias sulfuro-oxidantes (Castells, 2005).

2.3.8.1.4.3.3 POR ADICIÓN DE CLORURO DE HIERRO

La adición de cloruro de hierro bien en líquido dentro del digestor, bien en el sustrato antes de la alimentación, es un método altamente eficiente, pero económicamente poco ventajoso. El hierro reacciona con los sulfuros formando sulfuro de hierro que precipita. Es recomendable en sistemas con muy alto contenido en sulfuros. Las eliminaciones son altas, pero no se llega a niveles de depuración necesarios para el uso en vehículos (Castells, 2005).

2.3.8.1.4.3.4 ÓXIDO DE HIERRO

La cantidad de sulfhídrico que se puede eliminar está estequiométricamente relacionada con la cantidad de hierro presente. El sulfhídrico reacciona con el óxido férrico para formar sulfuro

férrico. La reacción es ligeramente endotérmica, con una temperatura mínima de 12 °C. La temperatura óptima está entre 15 y 50 °C, y se requiere presencia de humedad, por lo que conviene que el biogás no esté demasiado seco, aunque tampoco saturado para condensaciones en el filtro que reducirían la superficie activa. En el proceso de regeneración se añade oxígeno para convertir el sulfuro de hierro en óxido férrico y azufre elemental. El proceso de regeneración debe estar bien controlado, ya que es un proceso exotérmico. Los filtros de hierro pueden ser regenerados de 3 a 5 veces, dependiendo de la cantidad de azufre eliminada. Normalmente se trabaja con dos lechos, uno en operación y el otro regenerándose (Castells, 2005).

2.3.8.1.4.3.5 VIRUTAS DE MADERA CUBIERTAS DE ÓXIDO DE HIERRO

Gracias a la baja densidad de la madera se consigue una relación superficie-peso muy alta, optimizando el contacto y favoreciendo la reacción. La relación a obtener es del orden de 20 gramos de sulfhídrico por 100 gramos de virutas (Castells, 2005).

2.3.8.1.4.3.6 PELLETS IMPREGNADOS DE ÓXIDO FÉRRICO

La densidad de los pellets es más alta que las virutas. La capacidad de carga es de 50 g de H₂S por 100 gramos de pellets para concentraciones de H₂S de 1,000 a 4,000 ppm.

Uso de columnas de adsorción, utilizando un material adecuado, tal como el carbón activo (Castells, 2005).

2.3.8.1.4.3.7 FILTROS MOLECULARES

Los filtros moleculares se pueden usar para eliminar ácido sulfhídrico, mercaptanos, agua y otras impurezas. Consisten en compuestos de alúmina o sílice activada que tienen gran afinidad por moléculas polares. Proporcionan superficies activas muy altas y tienen tamaños de poros bien definidos, lo que permite la eliminación selectiva de las diferentes sustancias. El área superficial se puede regenerar haciendo pasar un gas caliente (200 a 315 °C) a través del lecho del reactor.

Este método se puede usar para eliminar agua y/o H₂S a media o pequeña escala (Castells, 2005).

2.3.8.1.4.3.8 MÉTODOS EN MEDIO LÍQUIDO

El ácido sulfhídrico puede ser absorbido de forma selectiva en gran variedad de soluciones acuosas. La absorción se lleva a cabo en un scrubber, equipado con un relleno que aumenta la superficie de contacto. Existen diversas tecnologías, pudiéndose utilizar diversas soluciones absorbentes. Si la instalación es bastante grande las soluciones pueden ser regeneradas, y el azufre recuperado para usos industriales. El proceso de absorción se lleva a cabo a bajas temperaturas y altas presiones. Para regenerar la solución normalmente se calienta la solución para disminuir la solubilidad y liberar el gas concentrado (azufre). El azufre puede entonces ser recuperado del gas concentrado mediante el proceso Claus. Los métodos en fase líquida resultan muy caros, tanto por el coste de inversión como por el consumo de compuestos químicos, por lo que tan solo es aplicable en instalaciones de gran tamaño (Castells, 2005).

2.3.8.1.4.4 MÉTODOS DE CONCENTRACIÓN DEL BIOGÁS Y ELIMINACIÓN DE CO₂

Los métodos de lavado con soluciones acuosas para eliminar el H₂S son también aplicables para la eliminación del CO₂. Normalmente el biogás es presurizado y alimentado por la parte inferior de una columna empacada con una solución acuosa a contracorriente. Igualmente, el CO₂ se puede eliminar mediante filtros moleculares o procesos de membrana, que pueden separar selectivamente diferentes compuestos. Se puede utilizar una solución de yeso (sulfato cálcico hidratado) o hidróxido de calcio que fijan el CO₂ al burbujear el gas a través de la solución. El producto resultante, carbonato de calcio, puede tener aplicación como enmienda caliza. En general, no es justificable desde un punto de vista económico el uso de filtros de CO₂, a no ser que el gas se vaya a comprimir a elevadas presiones para su uso en vehículos, con el objetivo de enriquecer su contenido en metano (Castells, 2005).

2.3.8.2 LODO DIGERIDO

Aparte del gas producido, el proceso también arroja un efluente líquido, o lodo, que puede devolverse a la tierra como acondicionador y fertilizante. El lodo, es una suspensión negruzca, exenta de olores ofensivos, se sedimenta fácilmente y tiene un pH aproximadamente neutro. Tiene abundante nitrógeno en forma de amonio (NH₄), así como fósforo, potasio, y sales

metálicas, todos los cuales son importantes para el crecimiento y nutrición de las plantas; también contiene materiales orgánicos no digeridos como proteínas, celulosa, grasas, etc (Steadman, 1978; Jarabo y Elortegui , 2000).

Se puede emplear en la horticultura hidropónica, es decir, en el cultivo de plantas en una solución nutritiva sin tierra. Puede emplearse también para cultivar algas, que pueden servir para alimentar el ganado, o emplearse también para alimentar a los pequeños insectos o invertebrados que comen los peces, o darse directamente como alimento, en sistemas de cría intensiva de especies tales como la carpa y tilapia (Steadman, 1978).

CAPÍTULO 3 CASO DE ESTUDIO

3.1 RESIDUOS ORGÁNICOS DE CIUDAD UNIVERSITARIA

3.1.1 MANEJO DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN CIUDAD UNIVERSITARIA

En Ciudad Universitaria el manejo de residuos orgánicos se realiza de la siguiente manera, según el informe emitido el nueve de marzo del 2009 a las 7:17 pm por la DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS Y CONSERVACIÓN. OFICIO No. DGOYDC/0396/09.

1. Manejo de la separación y disposición de la materia orgánica e inorgánica.

Solo se separa en la fracción de materia orgánica de carácter vegetal derivada de las actividades propias del mantenimiento de las 200 ha (aproximadamente) de áreas verdes jardinadas que están a cargo de la DGOyC. El resto de la materia orgánica (la derivada de cafeterías) no es colectada ni procesada para fines de composteo, esto debido a que la actual planta de compost carece de la tecnología adecuada para llevar a cabo este proceso.

2. Estadísticas de la cantidad de desecho anual.

En el Anexo I se muestran los datos de colecta y entrega de compost de los años 2006 2007 y 2008

3. Descripción de la forma de recolección y horarios.

Para efectos de la recolección, ésta se divide en 4 áreas principales: campus Central, áreas deportivas, circuito interior y circuito exterior. De las cuatro zonas la única en donde la colecta es manual es el campus Central, esto es debido a la gran cantidad de basura inorgánica que es depositada por parte de los concesionarios de las barras de alimentos que se encuentran en la periferia de dicho sitio.

En el resto de las zonas, la colecta es mecánica. Esto es por medio de contenedores metálicos de 4 metros cúbicos (aprox.) que son colocados y retirados de manera periódica, horario para efectuar esta función, es de 7:00 AM a 16:30 PM.

4. Manejo de la separación y disposición de la biomasa de corte de arbustos, árboles y materia orgánica.

La materia orgánica de árboles y cortes de carácter vegetal derivada de las actividades de jardinería se maneja desde hace casi 16 años por parte de la coordinación de Áreas Verdes y Forestación a través de la planta de compostaje.

5. Tipos de reciclado

El tipo de manejo que se lleva a cabo es a través del aireado y volteado de pilas estáticas (windrow) en una planta de compostaje de tipo 3 (de acuerdo a la EPA) la cual es una instalación de compostaje que acepta los siguientes tipos de materia prima: Desechos de jardín, materias de plantas agrícolas, desechos de animales, agentes de carga tales como virutas, paja, aserrín, triturado de cartón, etcétera y aditivos tales como urea, cascarilla de arroz, lombrices de tierra, inóculo fúngico, cáscara de huevo, etc.

6. Tiraderos de Ciudad Universitaria

La materia orgánica de árboles y cortes que aquí se maneja es depositada en 40 contenedores metálicos que se encuentran distribuidos en la Ciudad Universitaria. Debido al carácter propio del trabajo de jardinería estos contenedores no se encuentran fijos y pueden ser re ubicados de acuerdo a las necesidades cotidianas del trabajo.

3.1.2 CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE CAFETERÍAS DE CIUDAD UNIVERSITARIA

Debido a que datos estadísticos sobre los desechos orgánicos en CU no fueron encontrados en alguna memoria ó antecedente escrito, se procedió a cuantificar el desecho en forma manual.

La cuantificación de los residuos de restaurantes de CU se realizó de la siguiente manera, se efectuaron entre 4 y 10 mediciones diarias de 11 cafeterías dentro del campus, las mediciones se hicieron con báscula de piso, restando a cada medición el peso de los contenedores.

El tipo de residuos que se midió fue de tipo orgánico y de antemano se pidió a los propietarios de las cafeterías que se realizara el esfuerzo de no verter residuos de tipo inorgánico en dichos contenedores.

Los restaurantes sujetos a medición fueron: Cibarium de Facultad de Ingeniería, Frutería del Anexo de Ingeniería, Cafetería del Gimnasio de Ex reposo de Atletas, Restaurante de Medicina, Cafesín del Anexo de Ingeniería, Cafetería de Facultad de Contaduría, Cafetería de Facultad de Química,

Cafetería de Facultad de Odontología, Cafetería de Facultad de Diseño Industrial, Cafetería de Facultad de Filosofía y Letras, Cafetería del Instituto de Física y por último la Cafetería de Facultad de Arquitectura.

En la Figura 3.1 se muestra un plano de la ubicación de las diferentes cafeterías sometidas a medición.



Figura 3. 1 Plano de localización de cafeterías sometidas a cuantificación de RUO

En el Anexo 2 se muestra una lista con algunos de los establecimientos como cafeterías o barras con autorización o permiso para laborar (otorgado por la UNAM).

En la Tabla 3.1 se muestra el promedio diario, el máximo y mínimo de RUO generados en dichas cafeterías.

Se puede observar que en algunas cafeterías la variación entre la máxima y mínima producción de RUO es significativa. Esto se debió a que en algunas ocasiones los residuos habían sido mezclados con residuos inorgánicos y por tanto sólo se procedía a medir la fracción de los que estaban separados de origen, ya que son los únicos que interesan en esta tesis.

Por lo anterior se estima que en promedio la cantidad de RUO generados en cafeterías de CU es 426.2541 kg/día.

Tabla 3. 1 Producción Diaria Promedio, Máximo y Mínimo de ROU generados en Restaurantes de CU.

	CAFETERÍA	PROMEDIO Kg RUO/día	PRODUCCIÓN MÁXIMA Kg RUO/día	PRODUCCIÓN MÍNIMA Kg RUO/día
1	Arquitectura	32.79	90	8.0
2	Filosofía y Letras	76.7	107	52.0
3	Instituto de Física	8.50	9.5	6.5
4	Diseño Industrial	10.20	12	8.0
5	Odontología	19.60	22	18.0
6	Química	11.00	13	8.0
7	Contaduría	13.60	16	12.0
8	Cafesín Anexo de Ingeniería	31.70	46	26.0
9	Medicina	14.60	18	11.0
10	Ex reposo de Atletas	8.80	14	7.0
11	Frutería Anexo de Ingeniería	133.80	173	115.0
12	Cibarium Facultad de Ingeniería	65.00	73	59.0
	Total	426.25	593	330.5

En la Figura 3.2 se muestran algunas de las cafeterías sometidas a medición y en la Figura 3.3 se muestran fotografías de los residuos de dichas cafeterías.



Figura 3. 2 Cafeterías sometidas a medición.



Figura 3. 3 Residuos de cafeterías sometidas a medición.

3.2 CONDICIONES DE LA CAFETERÍA DE CASO DE ESTUDIO

La cafetería perteneciente al Anexo de la Facultad de Ingeniería – Cafesín, está ubicada en el circuito universitario frente al Anexo de Ingeniería y la Facultad de Ciencias y tiene un horario de apertura y cierre de 7:00 am – 8:00 pm respectivamente.

En la Figura 3.4 se muestra la ubicación de la cafetería Cafesín y en Figura 3.5 se muestra la vista aérea.

En esta cafetería separan sus residuos y son depositados en los contenedores que se encuentran fuera de la cafetería, respetando la separación de los residuos. El horario en el cual se recolecta la basura por camiones es: 6 am (se saca desde las 6:30 pm del día anterior) y 5 pm (se saca desde la 1:00 pm del mismo día); el costo por recolección de la basura es nulo.

El número máximo, medio y mínimo de comensales que presenta es de 300, 250 y 100 respectivamente. Los periodos en los que hay más, menos comensales y el tiempo en el que se mantienen inactivos son: periodo escolar, en las vacaciones escolares y en vacaciones administrativas respectivamente.

Dicha cafetería presenta espacio suficiente a sus alrededores para instalarse un digestor. Así mismo existe la posibilidad de que de manera muy sencilla se realicen la instalación de tuberías para conducir el biogás a la cocina de la misma. En la Figura 3.6 se muestran fotos de las condiciones y el espacio la cafetería Cafesín, en la Figura 3.7 se muestra el plano de la cafetería el Cafesín y en la Figura 3.8 se muestran fotos de las condiciones de la cocina de la cafetería Cafesín.

3.3 GASTOS ENERGÉTICOS

En esta cafetería no se tiene un control interno sobre el consumo de energía eléctrica, ya que el importe se integra al pago con la cuota que se da por ocupar el espacio, sin embargo el gasto de gas es de \$80,000 pesos-México al año.



Figura 3. 6 Fotografía del área propuesta de instalación del digestor.

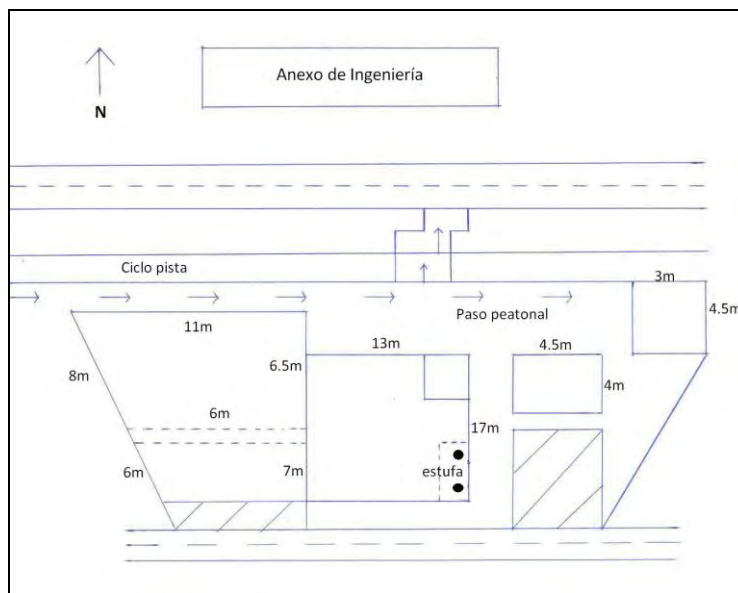


Figura 3. 7 Plano de la cafetería Cafesín.



Figura 3. 8 Cocina de la cafetería Cafesín

CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA

4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS DESECHOS

En la cafetería del Anexo de Ingeniería-Cafesín, se logró observar que los residuos son de tipo muy variado, comprendiendo esto, a restos de naranja, verdura, frutas diversas, frijoles, arroz, pollo, carne de res y cerdo, pan, tortilla, chile, entre otros y en la Figura 4.1 se muestran parte del contenido de un bote de recolección de residuos orgánicos de dicha cafetería.



Figura 4. 1 Muestra de los residuos generados en el Cafesín.

Los residuos que con más frecuencia se presentaron en los botes de recolección de basura orgánica, así como la proporción de los mismos, se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4. 1 Tipos y proporción de los residuos orgánicos generados con mayor frecuencia en la cafetería Cafesín.

TIPO DE RESIDUO ORGÁNICO	PROPORCIÓN
Restos de zanahoria, chayote, cebolla, cilantro, lechuga y jitomate.	50%
Restos de pan y tortilla.	
Restos de melón y papaya.	
Cáscara de naranja.	50%

Dichos residuos orgánicos presentan ciertas características físicas y químicas, las cuales fueron determinadas a partir de los procedimientos mencionados en el inciso 2.1.1.1.2 son mostradas en las Tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4. 2 Resultado de la caracterización física de los residuos generados en la cafetería Cafesín.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Densidad	1,414.47 kg/m ³
Humedad	30%

Tabla 4. 3 Resultados de la caracterización química de los residuos generados en la cafetería Cafesín.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS		
Sólidos Totales g/L	Sólidos Totales Volátiles g/L	Sólidos Totales Fijos g/L
253.12	245.32	7.79

4.2 DISEÑO DEL REACTOR A NIVEL LABORATORIO

El digestor y el contenedor de biogás, diseñados para la fase de experimentación, tienen las siguientes características:

a) Digestor.

Botella de PET (tereftalato de polietileno) de 3L de capacidad, con una altura de 0.4 m y un diámetro máximo de 0.37 m, unida con silicón a una manguera de hule, la cual fungirá como vía de salida del gas producido, tal como se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4. 2 Fotografía del reactor a nivel laboratorio utilizado como digestor.

b) Aislante.

El aislante del reactor es una bolsa hecha con 2 capas de tela polar y dos capas de plástico y una jareta para el ajuste en la boquilla, tal como se muestra en la Figura 4.3.



Figura 4. 3 Bolsa aislante para el reactor.

c) Recipiente colector del gas.

El recipiente colector del gas producido, mostrado en la Figura 4.4, es una botella de PET (Tereftalato de Polietileno) de 2.5 L de capacidad, la cual tiene una resolución de 50 ml; así mismo se le colocó una válvula de gas como se muestra en la Figura 4.5, para que la quema del gas se realizará de una forma sencilla y controlada.



Figura 4. 4 Recipiente recolector de biogás



Figura 4. 5 Válvula de de quema para el biogás.

4.3 INÓCULO

Para la realización del experimento, el inóculo utilizado fue excremento de vaca; ya que éste contiene bacterias metanogénicas responsables de la producción de metano dentro del digestor (Steadman, 1978).

Dicho inóculo presenta en forma general características físicas y químicas que se presentan en la Tabla 4.4.

Como ya se dijo anteriormente, el inóculo utilizado para la realización de este experimento fue estiércol vacuno por su contenido de bacterias metanogénicas. En cuanto al porcentaje utilizado, se puede decir que obedece a lo recomendado por el autor Steadman (1978) y Castro-González (2009). Dicho porcentaje es del 30 % del volumen útil del biodigestor.

Tabla 4. 4 Características físicas y químicas de excremento vacuno (Guevara, 1996).

CARACTERÍSTICA	CANTIDAD	UNIDADES
Sólidos totales	20.0	%
Sólidos volátiles	15.8	%
Humedad	83.0	%
Contenido seco	17.0	%
Contenido de carbono	7.3	%
Contenido de nitrógeno	0.29	%
Relación C/N	25:1	-

4.4 ARRANQUE DEL DIGESTOR

Las etapas para las que se realizó a nivel laboratorio el arranque del digestor fueron las siguientes:

1. Se tomó una muestra de los residuos orgánicos generados en la cafetería de estudio.
2. Se cortaron los residuos en pequeños trozos no más grandes que 1 cm² aproximadamente, tal como se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4. 6 Residuos preparados para la carga al digestor.

3. El volumen total del reactor es de 3 L de capacidad, del cual el volumen útil fue del 85%, lo cual correspondió a 2.55 L.

De los 2.55 L que corresponden al volumen útil, el 50% fue ocupado por residuos orgánicos, 30% por inóculo y 20% por agua.

En la tabla 4.5 se muestra a detalle la proporción, el volumen y el peso de cada una de las partes que harán posible el arranque del digestor.

Tabla 4. 5 Proporción de volumen y peso de cada uno de los componentes en la carga para el arranque del digestor experimental.

VOLUMEN			
TOTAL	VOLUMEN	RESIDUOS	Naranja
3 L	ÚTIL	ORGÁNICOS	50%
100 %	2.55 L	50%	V=0.6375 L
	P= 2.475 kg	V= 1.275 L	Residuos de <i>zanahoria, chayote, cebolla, cilantro, lechuga, jitomate, pan, tortilla, melón y papaya.</i>
	85 %	P= 1.075 kg	50%
			V= 0.6375 L
		INÓCULO	
		30%	
		V=0.765 L	
		P= 0.750 kg	
		AGUA	
		20%	
		V=0.510 L	

P=peso en kg

V=volumen en litros (L)

4. Se mezclaron todos los componentes anteriormente mencionados y se estabilizó el pH con 191.7 g/L equivalente a 4.79 M y 27 cucharadas soperas de sosa.

5. Se realizó el llenado del reactor con la mezcla anteriormente hecha y se colocó la funda aislante. La Figura 4.7 muestra el digestor con carga como se indicó y en la Figura 4.8 se muestra el digestor ya con la cubierta aislante colocada.



Figura 4. 7 Digestor con carga completa en el arranque.



Figura 4. 8 Cubierta aislante del digestor.

6. Ya concluida la etapa anterior, se prosiguió a llenar la botella colectora con agua pura, se le colocó agua a una cubeta y se introdujo la botella llena de agua (con la boquilla hacia abajo)

dentro de la cubeta, de esta forma el agua contenida en la botella colectora solo será desplazada hacia afuera de ella cuando comience a producirse biogás (Figura 4.9).



Figura 4. 9 Arreglo del reactor con cubierta aislante y almacenador del biogás.

4.5 PRESENCIA DE METANO EN EL BIOGÁS Y SU INFLAMABILIDAD

La manera en la que se determinó si el biogás contenido en la botella colectora contenía metano fue la siguiente:

- a. Se verificó que el pH de la mezcla del digester no tuviera variaciones que estuvieran fuera del rango de 6.5-8.5 de pH.
- b. En el momento que la condición anterior se cumplió se procedió a retirar la manguera de la botella colectora, después la manguera se aseguró para evitar la salida del biogás contenido en el digester y la botella colectora se tapó y todo lo anterior se realizó sin sacar la botella colectora de la cubeta con agua.
- c. Manteniendo la botella dentro del agua y una vez realizadas las actividades anteriores se procedió a encender un fósforo y a colocarlo cerca de la válvula de la botella colectora la cual inmediatamente de esta acción fue abierta, mientras tanto a la botella colectora se le aplicaba presión para que el biogás contenido en ella se liberara y pudiera servir de combustible. En la Figura 4.10 se muestran fotografías del contenido de metano en el biogás y su inflamabilidad.

La inflamabilidad del biogás fue de intensidad variable por tanto fue clasificado como se muestra en la Tabla 4.6. En dicha Tabla se presentan los índices de inflamabilidad de biogás, los cuales son directamente proporcionales a la cantidad de metano (CH_4) contenido en el biogás generado. A continuación se da una breve explicación del criterio que se tomó para determinar los índices de inflamabilidad mostrados en la Tabla 4.6:

Nula: No hay flama, al dejar escapar el gas de la botella se apaga la flama del fósforo.

Baja: Al dejar escapar el biogás de la botella y acercarle el fosforo se observa un flamazo donde las características de la flama son las siguientes: Transparente en el centro y azul claro en el contorno y su duración es de 6-10 segundos.

Media: Al dejar escapar el biogás de la botella y al acercarle un fósforo se observa que la flama es de color azul difuso y se mantiene encendida de forma continua. Dicha flama se extingue antes de que el biogás contenido en la botella se termine.

Alta: Al dejar escapar el biogás de la botella y al acercarle un fósforo se observa que la flama es de color azul muy nítido, continua y con forma definida. Dicha flama solo se extingue cuando el biogás contenido en la botella se acaba.

Tabla 4. 6 Grado de inflamabilidad del biogás generado.

ÍNDICE	INFLAMABILIDAD DE BIOGÁS GENERADO
0	Nula
1	Baja
2	Media
3	Alta

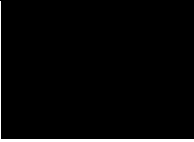
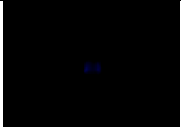


FOTO	INFLAMABILIDAD DE BIOGÁS GENERADO
	Nula
	Baja
	Media
	Alta

Figura 4. 10 Contenido de metano en el biogás y su inflamabilidad

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 OPERACIÓN DEL REACTOR A FLUJO INTERMITENTE

5.1.1 PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL

En las siguientes Figuras se muestran los resultados obtenidos al operar el digestor a flujo intermitente.

En la Figura 5.1 se muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo. La temperatura dentro del reactor se mantuvo relativamente constante con el paso del tiempo, se puede observar que la temperatura máxima registrada fue de 24°C y la mínima de 18°C. El tiempo de operación fue del 03 de julio al 19 de julio de 2009.



Figura 5. 1 Registro de temperatura en la operación del digestor experimental.

En la figura 5.2 se muestra la relación que existe entre la temperatura y la generación de biogás. Como se puede observar, la temperatura se mantuvo dentro de un rango de temperaturas entre 18 y 24 °C y no ocurrieron cambios drásticos de la misma al comenzarse a generar el gas metano ya que entre los días 9 y 14 la temperatura se mantuvo en el rango de temperaturas de 18 a 20 °C.

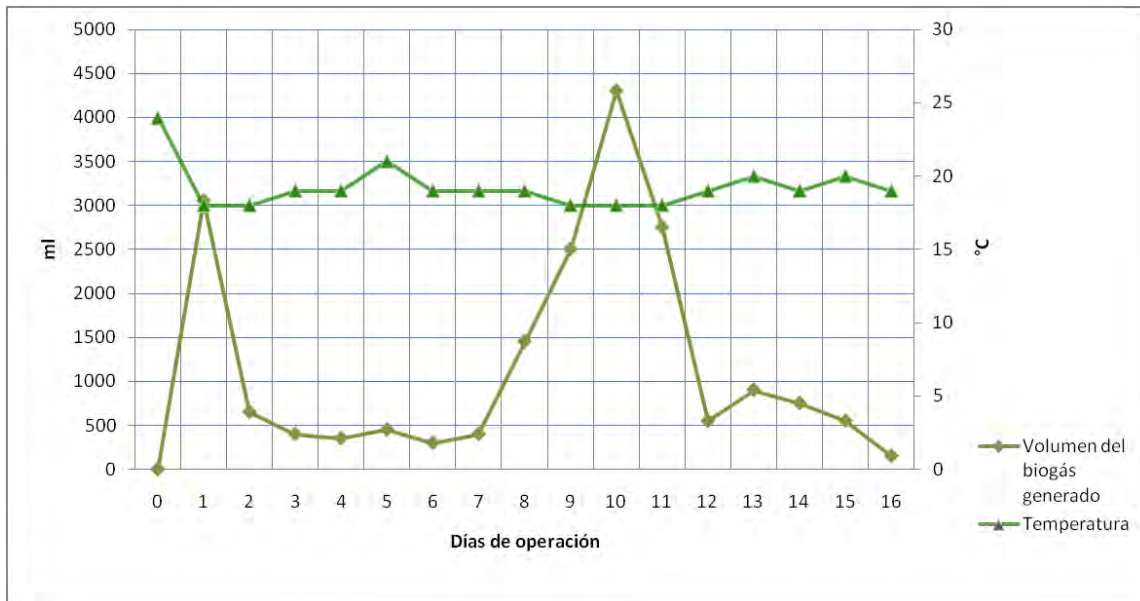


Figura 5. 2 Relación de la temperatura con la producción de biogás.

En la Figura 5.3 se muestra el comportamiento del pH y la temperatura con respecto al tiempo. En esta gráfica se puede observar que la variación del pH es mínima y se encuentra dentro del rango de 6 a 6.5, los primeros 9 días en los que se produjo únicamente bióxido de carbono, y a partir del día 10 hasta el día 14 que es cuando se produjo gas metano, se mantuvo constante en el valor 7. Así mismo se puede observar que los días siguientes, en los cuales la producción de metano cesó, el valor del pH varió en el rango de 6 a 6.2. Mientras tanto, la temperatura se mantuvo relativamente constante, aunque entre los días 9 a 14 que es cuando se produjo metano, ésta mantuvo una estabilidad más cerrada ya que tan sólo hubo una variación de 2 °C.

Debido a lo anterior se afirma que los cambios en el pH obedecen a las reacciones que ocurren dentro del digestor; y que la poca variabilidad de la temperatura, propició que se dieran las condiciones óptimas dentro del digestor para que se llevaran a cabo de forma correcta las etapas de digestión.



Figura 5. 3 Relación de pH con la temperatura de operación.

En la Figura 5.4 se puede observar que el pH varía dentro del rango de 6-7, lo cual ayudó a que el proceso de digestión se llevara a cabo de manera correcta. También se puede observar que la producción de biogás comenzó desde el primer día y que para el día 10 se comenzó a producir gas metano, momento en el cual el pH se tornó a 6.5; así mismo se observa que la mayor producción de biogás se obtuvo en el día 10 y que a partir de ahí comenzó a disminuir.

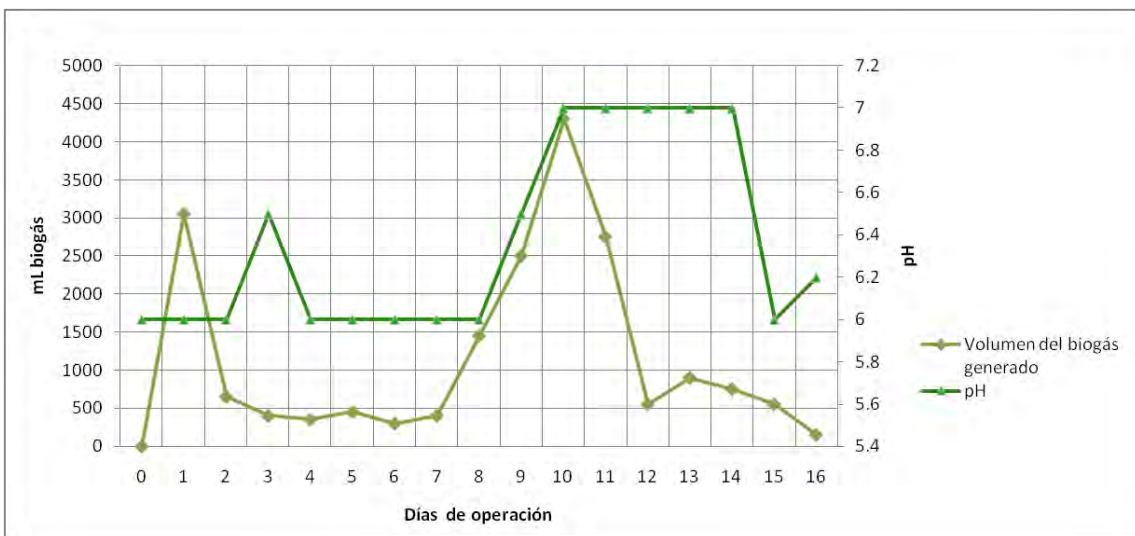


Figura 5. 4 Relación del pH con la producción de biogás.

En la Figura 5.5 se puede observar que la inflamabilidad del gas comenzó a partir del día nueve, que la mayor inflamabilidad se obtuvo en los días once y doce y que el último día que el gas inflamó fue el día catorce.

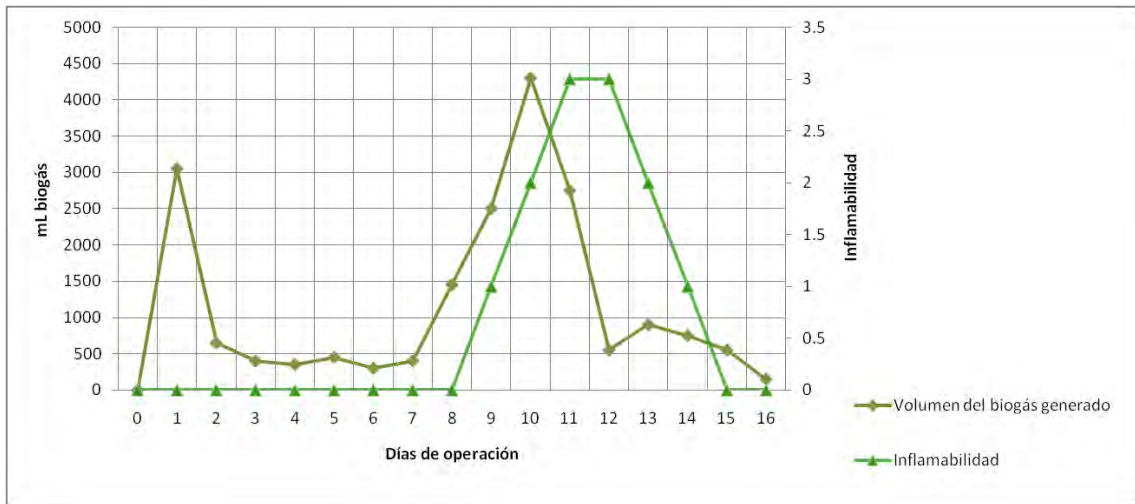


Figura 5.5 Pruebas de inflamabilidad y la producción de biogás.

Donde el grado de inflamabilidad fue clasificado como se muestra en la Tabla 4.6.

En la Figura 5.6 se muestra una fotografía de la combustión de biogás generado en este experimento.

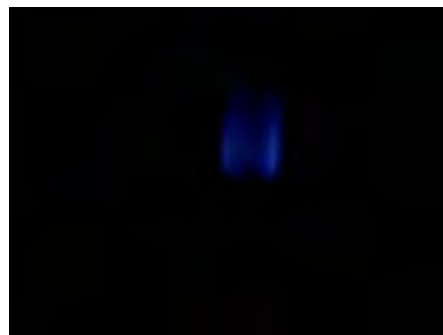


Figura 5.6 Combustión del biogás generado.

En la figura 5.7 se muestra el tiempo de retención hidráulica experimental (TRH), el cual es de 16 días, para la temperatura promedio de 19 °C. Este TRH se determinó de acuerdo al tiempo en el

que tuvo que mantener la materia dentro del digester para que comenzara y terminara de producir gas inflamable. Todo lo anterior se determinó como respuesta del reactor en la experimentación.

En la Figura 5.7 se muestra la cantidad de biogás acumulado en los 16 días que duró el experimento. Y como se puede observar esta producción mantuvo una tendencia a la baja desde el día 10, momento en el que se determinó que después del último día que el biogás inflamara se tomarían dos días más, para retirar el lodo digerido del digester, siendo éste el tiempo de residencia hidráulica.



Figura 5. 7 Producción de biogás acumulado en la operación del digester experimental.

En la Figura 5.8 se muestra el lodo digerido resultante de la digestión experimental. Se puede observar que se presenta un color oscuro y es relativamente líquido, no muestra trozos grandes de materia y algo muy importante es que presenta un olor fétido y muy fuerte a diferencia de lo que se menciona en la teoría. Esto debido a que hace falta un tiempo de operación más largo.



Figura 5. 8 Características del lodo digerido.

En la Tabla 5.1 se muestran las características químicas del lodo digerido, las cuales fueron obtenidas a través de un análisis químico de laboratorio. Con esto es posible obtener el porcentaje de remoción promedio obtenido.

Tabla 5. 1 Características químicas del lodo digerido.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL LODO DIGERIDO, SUSTRATO ALIMENTADO Y CARGA REMOVIDA			
	SÓLIDOS TOTALES (ST) g/L	SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES (STV) g/L	SÓLIDOS TOTALES FIJOS (STF) g/L
Lodo digerido	90.34	64.33	26.01
Sustrato alimentado	253.12	245.33	7.79
Carga removida	162.77	181	

Con los datos anteriores se realiza el cálculo siguiente para obtener el % de remoción de ST :

1. Porcentaje de sólidos totales removidos:

$$\text{ST removidos} = (253.12 - 90.34) \frac{g}{L}$$

$$\text{ST removidos} = 162.78 \frac{g}{L}$$

$$\% \text{ de remoción de ST} = \frac{(162) \frac{g}{L} * 100}{253.12 \frac{g}{L}}$$

$$\% \text{ de remoción de ST} = 64.3\%$$

5.1.2 SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos al operar el digestor a flujo intermitente utilizando como inóculo el lodo digerido de la primera etapa experimental.

En la Figura 5.9 se muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo. Lo cual se traduce a que la temperatura dentro del reactor se mantuvo relativamente constante con el paso del tiempo, se puede observar que la temperatura máxima registrada fue de 25°C y la mínima de 17°C.

En la Figura 5.10 se puede observar que desde el momento en el que comenzó la producción de gas metano la temperatura estuvo por arriba del promedio, por lo contrario en los últimos días de generación de metano se puede observar que la temperatura comenzó a disminuir, lo cual se traduce a que en esta etapa la temperatura fue regida por los procesos que se llevan a cabo dentro del digestor.



Figura 5. 9 Registro de la temperatura de operación en la etapa a flujo intermitente.

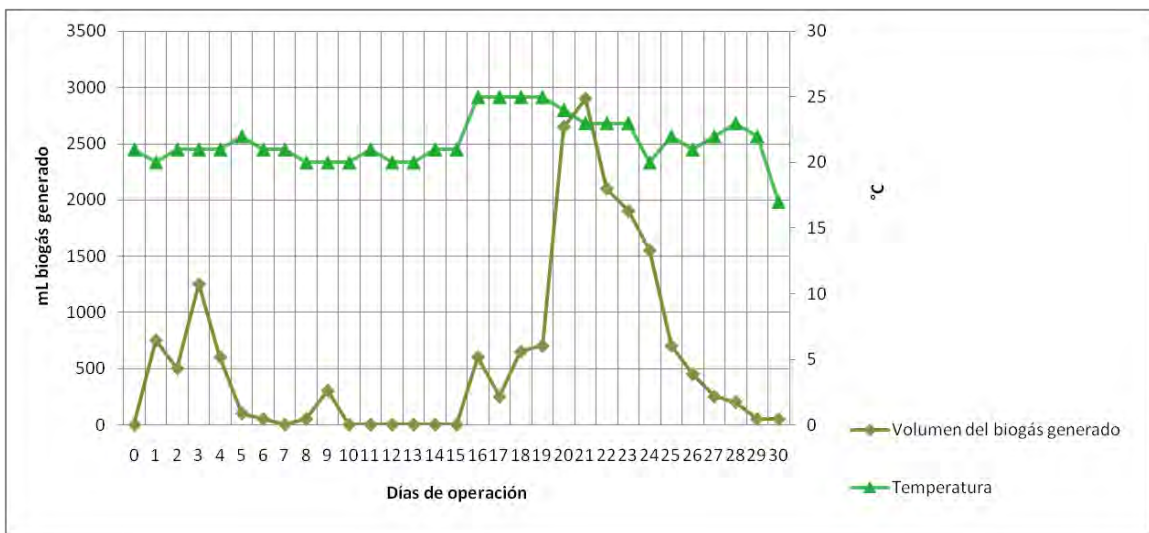


Figura 5. 10 Relación de temperatura con la producción de biogás en la etapa a flujo intermitente.

En la Figura 5.11 se muestra la relación entre el pH y la temperatura con respecto al tiempo. En esta figura se puede observar que la variación del pH se mantiene relativamente constante en el valor 6 los primeros 16 días, y a partir del día 17 hasta el día 29, el pH se mantiene entre 6.5 y 7.5, para después caer a 6 nuevamente.

También se puede observar que un día después de que el digestor se tornara básico, comenzó la producción de biogás inflamable, lo cual es el resultado la degradación de ácidos por parte de las bacterias metanogénicas. El pH aumenta debido a que los ácidos contenidos en la mezcla son transformados por dichas bacterias a CO₂ y CH₄ principalmente.

En la Figura 5.12 se puede observar que la generación de metano comenzó poco tiempo después de que el pH se tornó básico. También se puede observar que la producción de biogás comenzó desde el primer día. Asimismo se observa que la mayor producción de biogás se obtuvo en el día 21 y que a partir de ahí comenzó a disminuir.

En la Figura 5.13 se puede observar que la inflamabilidad del gas comenzó a partir del día 18, que la mayor inflamabilidad se obtuvo en los días 19 a 23 y que el último día que el biogás inflamó fue el día 28.

Donde el grado de inflamabilidad fue clasificado como se muestra en la Tabla 4.6.

En la Figura 5.14 se muestra una fotografía de la combustión de biogás generado en este experimento.

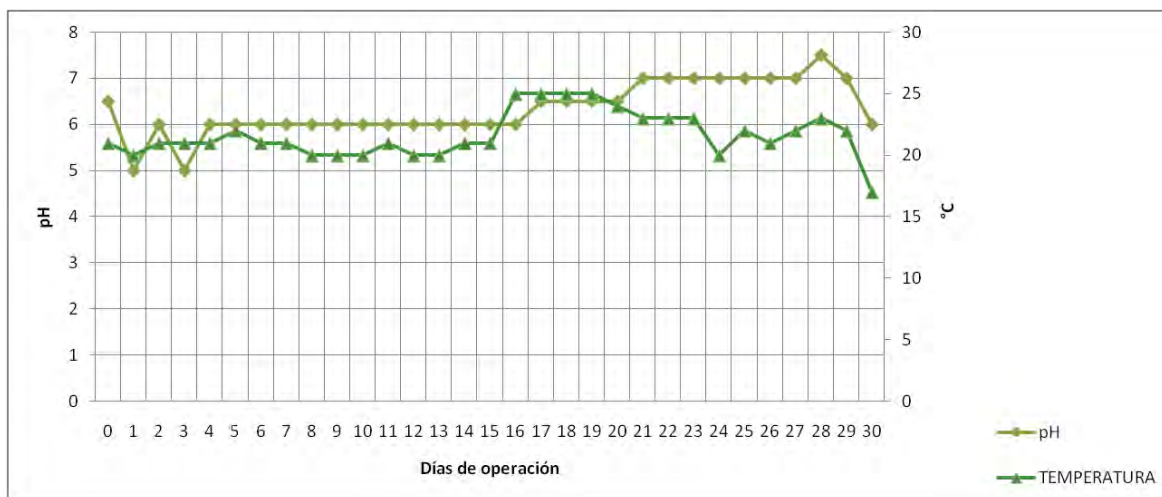


Figura 5. 11 Relación del pH con la temperatura en la etapa a flujo intermitente.



Figura 5. 12 Relación del pH y la producción del biogás en la etapa a flujo intermitente.

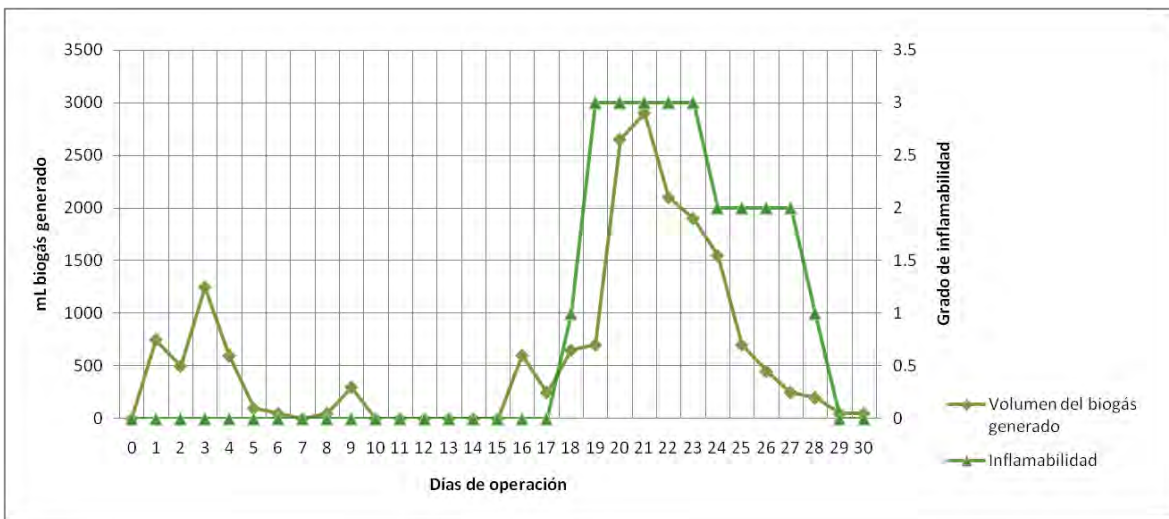


Figura 5. 13 Relación producción de biogás e índice de inflamabilidad en la etapa a flujo intermitente.

En la Figura 5.14 se muestra la combustión del biogás generado en la segunda etapa de experimentación.



Figura 5. 14 Combustión del biogás generado en la segunda etapa de experimentación.

En la Figura 5.15 se muestra el tiempo de retención hidráulica experimental (TRH) el cual es de 30 días, para la temperatura promedio de 21.64°C. Este TRH se determinó de acuerdo al tiempo en el que se mantuvieron los residuos dentro del digester, tomado como referencia para esto la producción de biogás inflamable.

En la Figura 5.15 se muestra la cantidad de biogás acumulado en los 30 días que duró el experimento, y como se puede observar esta producción mantuvo una tendencia a la baja desde el día 22 hasta que se obtuvo una producción casi nula.



Figura 5. 15 Biogás Acumulado en la etapa a flujo intermitente.

En la Figura 5.16 se muestra el lodo digerido resultante de la digestión experimental, como se puede observar presenta un color oscuro y es relativamente líquido, no muestra trozos grandes de materia y algo muy importante es que presenta un olor fétido y muy fuerte a diferencia de lo que se menciona en la teoría y de la misma manera que en la experimentación anterior.



Figura 5. 16 *Lodo Digerido*

5.2 RESUMEN DE RESULTADOS

En la Tabla 5.2 se muestra el resumen de los resultados de la primera y segunda etapa de experimentación.

5.3 ANÁLISIS DE DE RESULTADOS

En cuanto a los parámetros a considerar para que se realice la digestión están los siguientes: Tiempo de retención hidráulica, agitación y mezclado, preparación de los materiales, relación proporcional de sólidos a líquidos, pH y temperatura; y de acuerdo a estos se mencionarán las respuestas que mostraron los mismos al ser controlados y se analizarán los factores que llevaron a cada parámetro a tener un comportamiento en particular. Asimismo se analizarán las gráficas de producción biogás-pH, temperatura, inflamabilidad y tiempo de retención. De acuerdo a la experiencia obtenida se puede decir que el hecho de que se colocara un aislante a reactor, influyó directamente en el mantenimiento relativamente constante de la temperatura dentro del reactor, tal como se mostró en la Figura 5.1, lo cual propició que el tiempo de TRH fuera menor al teórico y que las reacciones ocurrieran de acuerdo a lo previsto en la teoría.

Tabla 5. 2 Resumen de Resultados Digester en su arranque (experimento 1) y su operación a flujo intermitente (experimento 2).

PARÁMETRO	EXPERIMENTO 1	EXPERIMENTO 2
Temperatura promedio °C	19	21
Temperatura máxima °C	24	25
Temperatura mínima °C	18	17
pH promedio	6.3	6.3
pH máximo	7	7.5
pH mínimo	6	5
pH estabilizado promedio	7.2	6.7
pH estabilizado máximo	8	8
pH estabilizado mínimo	7	6
Producción promedio de biogás m ³ /día	0.001147	0.0006
Producción máxima de biogás m ³ /día	0.0043	0.0029
Producción mínima de biogás m ³ /día	0	0
Biogás acumulado m ³	0.0195	0.0186
Volumen de biogás inflamable m ³	0.01175	0.01405
No. de días de producción de biogás inflamable	6	11
% de biogás inflamable	60	75
TRH días	16	30

Para el pH se puede observar que no tiene alguna relación en cuanto a variaciones de temperatura, para la primera etapa de experimentación, tal como se mostró en la Figura 4.12; en cuanto a la segunda etapa se tiene que las variaciones de pH, generalmente estaban relacionadas con la variación de la temperatura, es decir cuando la mezcla se tornaba acida la temperatura era relativamente baja y cuando el pH se tornaba básico la temperatura era relativamente alta.

Cabe señalar que el hecho de que la temperatura se mantuviera constante fue lo que propició que el pH de la mezcla, tanto de la primera como de la segunda etapa de experimentación, se comportara obedeciendo únicamente a los procesos químicos que ocurren dentro del reactor.

En cuanto a la producción de biogás, se puede decir que el hecho de que la temperatura se mantuviera relativamente constante y que se estabilizara el pH regularmente a un valor de 7, fue lo que propició que la producción de biogás fuera satisfactoria.

La inflamabilidad del gas producido durante el experimento fue variable, esto debido a que para que se llegue a producir gas metano, se requieren varios días en los cuales:

1. Las bacterias responsables de la hidrólisis producen unidades simples de azúcares, grasas y aminoácidos.
2. Las bacterias responsables de la acidogénesis producen ácidos orgánicos, dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2) y pequeñas cantidades de amoníaco (NH_3), ácido sulfhídrico (H_2S) y alcoholes, en especial glicerol.
3. Las bacterias responsables de la acetogénesis producen ácido acético e hidrógeno.
4. Por último las bacterias responsables de la metanogénesis producen CH_4 , CO_2 y agua.

Debido a los procesos anteriormente citados la producción de metano sólo se dará si se han llevado a cabo correctamente las fases anteriores, y como se pudo observar en la Figura 5.4, una vez que se ha transformado la mayoría de la biomasa en CH_4 , CO_2 y agua, entonces la producción de metano disminuirá hasta llegar a la producción nula.

En cuanto a la agitación y mezclado se puede decir que no aplicó para este experimento, sin embargo, fue necesario homogeneizar la mezcla manualmente, cuando se le adicionaba NaOH, obteniendo de esta forma un pH estable y homogéneo, lo cual propicio que las reacciones dentro del digestor se llevaran a cabo de forma exitosa.

Los resultados obtenidos de haber triturado los RUO en trozos de alrededor de 1 cm^2 , fueron totalmente exitosos ya que como se observó en la Figura 5.7 (lodo digerido) la degradación de éstos fue casi total. Otra razón por la que se puede afirmar que el triturar los RUO en trozos

pequeños fue exitosa, es que las bacterias tuvieron más área de acción y por lo subsecuente, esto también contribuyó a que se obtuviera un tiempo de retención hidráulica muy corto.

En cuanto al tiempo de retención que se obtuvo, se puede decir que fue muy corto y es nada parecido al que se estima en la bibliografía para una temperatura de 20° C en promedio, esto debido a que cada uno de los factores mencionados anteriormente contribuyeron satisfactoriamente en la digestión. En la Tabla 5.3 se muestra la comparación del tiempo de retención teórico y el experimental correspondiente a una temperatura de 20°C.

Tabla 5. 3 Tiempo de retención hidráulica comparado con otros estudios en este trabajo.

DIGESTOR A TEMPERATURA DE 20°C	
Dato	TRH, días
Teórico	44 (Mandujano, 1981).
Teórico	60 (Deublein y Steinhäuser, 2008).
Experimental 1	16
Experimental 2	30

Con los resultados obtenidos del análisis químico del lodo digerido y de la muestra de RUO, se determinó el porcentaje de remoción. El cual nos indica una aproximación del porcentaje de materia que fue transformada en los productos de la digestión.

La manera en la que se calculó el porcentaje de remoción se expresa en la ecuación 5.1:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{ST(\text{influentes}) - ST(\text{efluentes})}{ST(\text{influentes})} * 100 \dots\dots\dots 5.1$$

$$\% \text{ de remoción de } ST = \frac{(253.12 - 90.34)g}{253.12 \frac{g}{L}} * 100$$

$$\% \text{ de remoción de ST} = \frac{(162) \frac{g}{L} * 100}{253.12 \frac{g}{L}}$$

$$\% \text{ de remoción de ST} = 64.3\%$$

El resultado que se obtuvo de esta, es el siguiente: El porcentaje de remoción de la mezcla es del 64%, es decir, el 64% de la materia que se introdujo en el digestor, fue transformada a otros elementos.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la fase de experimentación, se puede afirmar que el lodo digerido, mantiene el mal olor y en ningún momento del proceso, la coloración del mismo se torno negra como se esperaba. Cabe señalar que al almacenarlo en un recipiente, este siguió produciendo gas, como si el proceso de descomposición se hubiese inhibido y con el paso del tiempo vuelto a estabilizar, para volver a generar biogás que debido a la disposición final del mismo, ya no se puede comprobar si es gas metano o no.

CAPÍTULO 6 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA PROPUESTA

6.1 FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL RESTAURANTE CAFESÍN

En este apartado se realizarán los cálculos necesarios para conocer las características de los componentes esenciales del sistema de digestión propuesto a instalar en la Cafetería Cafesín del Anexo de Ingeniería. Cabe destacar que todos los cálculos que se realizaron fueron considerados los datos obtenidos tanto en el experimento 1 como en el 2, a dichos cálculos serán llamados Método 1.

Así mismo se realizarán los cálculos para la producción de biogás tomando en cuenta parámetros teóricos, al cual se le denominará Método 2.

MÉTODO 1. A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES

Considerando los resultados experimentales como datos, se procederá a diseñar el sistema de digestión adecuado.

En la Tabla 6.1 y 6.2 se muestran los datos requeridos para el diseño de los sistemas de digestión de RUO, tanto para el Experimento 1 como para el Experimento 2.

Tabla 6. 1 Parámetros comunes de diseño para experimento 1 y experimento 2 (Método 1 a partir de datos experimentales).

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Densidad	kg/m ³	1,414.47
Producción diaria promedio de RUO en el Cafesín	kg	31.7
Volumen de RUO experimental 1 y 2 (VE)	m ³	0.000760002
% de Biogás	%	54

Tabla 6. 2 Parámetros de diseño específicos de Experimento 1 y Experimento 2.

DATO	UNIDAD	EXPERIMENTO 1	EXPERIMENTO 2
TRH= V/Q Tiempo de retención hidráulica en días.	Días	16	30
Producción promedio diaria de biogás para 1.075 kg de residuos	m ³ /día	0.001147059	0.0006
Producción de biogás (método 1)	m ³ biogás/ kg RUO	0.0181	0.0173

6.1.1 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL REACTOR POR MÉTODO 1 A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES.

Experimento 1. Cálculos a partir de datos experimentales

Tiempo de retención Hidráulica experimental del experimento 1(TRH): 16 días.

Tomando como referencia la fórmula para calcular el TRH, se puede calcular el volumen (V) del digestor de la siguiente forma:

$$TRH = \frac{V}{Q} \dots\dots\dots 6.1$$

$$V = TRH * Q \dots\dots\dots 6.2$$

Donde

TRH: Tiempo de retención hidráulica en días

V: Volumen del reactor m³

Q: Gasto m³/día

Sin embargo los RUO únicamente representan el 42.5% del volumen total, que tendrá el digestor, por lo cual, el volumen se calculará con las siguientes modificaciones a la ecuación 6.2:

$$V = \frac{(TRH * Q) * 100\%}{42.5\%} \dots\dots\dots 6.3$$

Antes que nada se calculara el gasto (Q: Gasto m³/día) de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{m}{v} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \dots\dots\dots 6.4$$

Donde:

m= masa (Kg)

v= volumen (m³)

$$\rho = \text{densidad} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$v \text{ (m}^3\text{)} = \frac{m}{\rho} \left(\frac{kg}{\frac{kg^3}{m}} \right) \dots\dots\dots 6.5$$

Sustituyendo valores en la ecuación 6.5 se tiene lo siguiente:

$$v \text{ (m}^3\text{)} = \frac{31.7}{1414.47} \left(\frac{kg}{\frac{kg^3}{m}} \right)$$

$$v = 0.0224 \text{ m}^3$$

Por tanto el gasto Q diario de RUO es:

$$Q = 0.0224 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Sustituyendo valores la ecuación 6.3 queda:

$$V = \frac{\left(16 \text{ días} * 0.0224 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) * 100\%}{42.5\%}$$

Por tanto el volumen del digestor será:

$$V = 0.8437 \text{ m}^3$$

Experimento 2. Cálculos a partir de datos experimentales

Para el experimento 2 se tiene un TRH y un gasto Q de:

Experimento 2 (TRH): 30 días.

Gasto: $Q = 0.0224 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$

Sustituyendo valores en la ecuación 6.3 para el Experimento 2:

$$V = \frac{\left(30 \text{ días} * 0.0224 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) * 100\%}{42.5\%}$$

$$V = 1.5819 \text{ m}^3$$

6.1.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS POR MÉTODO 1 (A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES)

Teniendo que la ecuación para calcular el volumen del tanque de almacenamiento del biogás es la siguiente, se procederá a realizar los cálculos correspondientes:

$$VGA = PG*20\% \dots\dots\dots 6.6$$

Donde:

VGA= Volumen del tanque de almacenamiento de biogás en m^3

PG= Producción diaria de biogás $\frac{m^3}{día}$

6.1.3 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS AL DÍA POR MÉTODO 1 (A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES)

Para obtener la producción diaria de biogás se realizan los siguientes cálculos:

Considerando el TRH y la producción diaria de RUO, es decir el gasto Q, se determina el volumen de RUO (VCarga) que se meterá al digestor por cada carga, el cálculo de VCarga se realiza de la siguiente manera:

$$VCarga = Q*TRH \left(\frac{m^3}{día} * día \right) \dots\dots\dots 6.7$$

Ahora si con los datos anteriores se realiza el cálculo de la producción de biogás por volumen de carga VCarga:

$$PGD = \frac{VCarga*PGE_n}{VE} \frac{m^3}{día} \dots\dots\dots 6.8$$

Donde

PGE_n: es la producción de gas diaria obtenida en el experimento n $\frac{m^3}{día}$

VE= Volumen de RUO experimental.

Experimento 1. Cálculos a partir de datos experimentales

De acuerdo con el Experimento 1 se tiene que la PGE1 promedio diaria para 1.075 kg de RUO es:

$$PGE1 = 0.0011 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Sustituyendo valores en la e 6.7 se determina el volumen de la carga que se meterá al digestor VCarga, de la siguiente manera:

$$VCarga = 0.0224 * 16 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \text{día} \right)$$

Y el VCarga es:

$$VCarga = 0.3585 \text{m}^3$$

Ya obtenidos estos datos se procede a calcular la cantidad de biogás generado a partir del volumen de carga VCarga con la ecuación e 6.8.

$$PGD = \frac{0.3585 * 0.0011}{0.0007} \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Por lo tanto la producción diaria de Biogás para 0.3585 m^3 de RUO es:

$$PGD = 0.5411 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Experimento 2. Cálculos a partir de datos experimentales

De acuerdo con el Experimento 2 se tiene que la PGE2 promedio diaria para 1.075 kg de RUO es:

$$PGE2 = 0.0006 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Sustituyendo valores en la e 6.7 se determina el volumen de la carga que se meterá al digestor VCarga, de la siguiente manera:

$$VCarga = 0.0224 * 30 \left(\frac{m^3}{día} * día \right)$$

Y el VCarga es:

$$VCarga = 0.6723 m^3$$

Ya obtenidos estos datos se procede a calcular la cantidad de biogás generado a partir del volumen de carga VCarga con la ecuación e 6.8.

$$PGD = \frac{0.6723 * 0.0006}{0.0007} \frac{m^3}{día}$$

Por lo tanto la producción diaria de Biogás para 0.3585 m³ de RUO es:

$$PGD = 0.5307 \frac{m^3}{día}$$

Ya obtenida la PGD tanto para el Experimento 1 como para el Experimento 2, se procede a calcular la producción de biogás por lote PG para cada caso, para que entonces se pueda calcular el volumen de tanque de almacenamiento de biogás.

El cálculo de la producción neta de biogás se realiza de la siguiente manera:

$$PG = PGD * TRH \frac{m^3 * día}{día} \dots \dots \dots 6.9$$

Experimento 1. Cálculos a partir de datos experimentales

Se sustituyen valores en la ecuación 6.9, para calcular la producción de biogás PG utilizando los datos del Experimento 1:

$$PG = 0.5411 * 16 \frac{m^3}{día} días$$

$$PG = 8.6591 m^3$$

Sustituyendo valores en la ecuación 6.6 del volumen del tanque de almacenamiento de biogás VGA, queda:

$$VG=8.6591*20\%$$

Por tanto el volumen del tanque de almacenamiento de biogás es:

$$VGA = 1.7318 \text{ m}^3$$

Experimento 2. Cálculos a partir de datos experimentales

Se sustituyen valores en la ecuación 6.9, para calcular la producción de biogás PG utilizando los datos del Experimento 2:

$$PG= 0.5307*30 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ días}$$

$$PG = 15.9237 \text{ m}^3$$

Sustituyendo valores en la ecuación e 6.6 del volumen del tanque de almacenamiento de biogás VGA, queda:

$$VG=15.9237 *20\%$$

Por tanto el volumen del tanque de almacenamiento de biogás es:

$$VGA = 3.1847 \text{ m}^3$$

6.1.4 CÁLCULO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LODOS DIGERIDOS POR MÉTODO 1. A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES

$$VAL=\left(Q*D*\frac{t}{12}\right)-V \dots\dots\dots 6.10$$

Donde

VAL: volumen de almacenamiento de lodos

t: tiempo de almacenamiento requerido (meses)

V: Volumen del reactor m^3

Q: Gasto $\frac{\text{m}^3}{\text{día}}$

D: días que se alimentará al digestor al año $\frac{\text{día}}{\text{año}}$

Experimento 1. Cálculos a partir de datos experimentales

Sustituyendo valores:

$$\text{VAL} = \left(0.0224 * 275 * \frac{2}{12}\right) - 0.8437 \quad \text{m}^3$$

$$\text{VAL} = 0.1834 \quad \text{m}^3$$

Experimento 2. Cálculos a partir de datos experimentales

Sustituyendo valores:

$$\text{VAL} = \left(0.0224 * 275 * \frac{4}{12}\right) - 1.5819 \quad \text{m}^3$$

$$\text{VAL} = 0.4723 \quad \text{m}^3$$

6.1.5 RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA OBTENIDOS POR EL MÉTODO 1 A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES

En la Tabla 6.3 se muestra un resumen de los datos obtenidos en los cálculos anteriores.

En dicha tabla se puede observar que la producción de biogás diaria de los experimentos 1 y 2 es muy similar, lo que se traduce a que el volumen de biogás no depende del TRH, ya que a pesar de que el TRH varíe sustancialmente, la capacidad de generar biogás por cada kg de RUO no variará.

Es decir el volumen total de biogás que puede generar cierta cantidad de RUO depende únicamente de la masa de los mismos.

Tabla 6. 3 Resumen de Cálculos de Factibilidad realizados por Método 1 para los Experimento 1 y 2.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MÉTODO 1 EXPERIMENTO 1 DIGESTOR 1	MÉTODO 1 EXPERIMENTO 2 DIGESTOR 2
Q: Gasto	m ³ /día	0.0224	0.0224
VCarga : Volumen de RUO por carga	m ³	0.3586	0.6723
V: Volumen del reactor	m ³	0.8437	1.5820
PB: Producción de biogás diaria	m ³ /día	0.5412	0.5308
PG: Volumen total de biogás acumulado	m ³ /carga	8.6592	15.9237
VCH ₄ : Metano acumulado	m ³ /carga	4.6760	8.5988
VA: Volumen del tanque de almacenamiento	m ³	1.7318	3.1847
VAL: Volumen de almacenamiento de lodos digeridos	m ³	0.1835	0.4724

MÉTODO 2. A PARTIR DE PARÁMETROS TEÓRICOS

6.1.6 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR EL MÉTODO 2. A PARTIR DE PARÁMETROS TEÓRICOS

El método que a continuación se explica depende principalmente de la relación entre la producción de biogás y los Sólidos Totales Volátiles de los RUO.

En las Tablas 6.4 y 6.2 se muestran los datos requeridos para el cálculo de la producción de biogás, tanto para el Experimento 1 como para el Experimento 2.

A partir de la tabla 6.2 se tomarán los parámetros de diseño específicos del experimento 1 y experimento 2.

Se omitirán los cálculos de volumen del digester y del tanque de almacenamiento de lodos digeridos, debido a que se calculan de la misma manera que en el Método 1.

Para realizar el cálculo de la producción de biogás, se calcula el *gasto Q diario de RUO*, de la misma manera que se calculó para el Método 1.

Por tanto el *gasto Q diario de RUO* es:

$$Q = 0.0224 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

A continuación se calcula la cantidad de Sólido Volátiles Totales con la ecuación 6.11 siguiente:

$$\text{STVD} = \text{STV} * Q \frac{\text{kg STV m}^3}{\text{m}^3 \text{ día}} \dots \dots \dots 6.11$$

Sustituyendo valores se tiene lo siguiente:

$$\text{STVD} = 245.320 * 0.0224 \frac{\text{kg STV}}{\text{día}}$$

$$\text{STVD} = 5.4979 \frac{\text{kg STV}}{\text{día}}$$

Ya obtenido este dato se prosigue a calcular la producción de biogás diaria con la ecuación 6.12 siguiente:

$$PBp = k \cdot STVD \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg STV}} \frac{\text{kgSTV}}{\text{día}} \dots\dots\dots 6.12$$

Tabla 6. 4 Parámetros Comunes de Diseño para Experimento 1 y Experimento 2.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Densidad	kg/m ³	1,414.47
Sólidos totales (ST)	Kg/ m ³	253.12
Sólidos totales volátiles (STV)	Kg/ m ³	245.32
Relación entre (STV) y producción de biogás (K)	m ³ biogás/kg STV	0.142
Relación entre STV y producción de biogás – mínima (K mín)	m ³ biogás/kg STV	0.225
Relación entre STV y producción de biogás – máxima (Kmáx)	m ³ biogás/kg STV	0.637
Producción diaria promedio de RUO	Kg	31.7
Volumen de RUO experimental VE	m ³	0.000760002
% de biogás	%	54

Sustituyendo valores queda lo siguiente:

$$PBp = 0.142 * 5.4979 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg STV}} \frac{\text{kgSTV}}{\text{día}}$$

Por lo tanto la producción diaria de biogás por cada 31.7 Kg de Residuos es:

$$PBp = 0.7807 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$$

A continuación se muestra ecuación 6.13 para calcular el volumen total del biogás que se espera producir para el Experimento 1 y Experimento 2.

$$PG = PBp * TRH \frac{\text{m}^3 * \text{día}}{\text{día}} \dots \dots \dots 6.13$$

Experimento 1. A partir de parámetros teóricos

Sustituyendo valores en la ecuación 6.13 queda:

$$PG = 0.7807 * 16 \frac{\text{m}^3 * \text{día}}{\text{día}}$$

Por lo tanto el volumen total de biogás generado para los datos del Experimento 1 es:

$$PG = 12.4912 \text{ m}^3$$

Experimento 2. A partir de parámetros teóricos

Sustituyendo valores en la ecuación 6.13 queda:

$$PG = 0.7807 * 30 \frac{\text{m}^3 * \text{día}}{\text{día}}$$

Por lo tanto el volumen total de biogás generado para los datos del Experimento 2 es:

$$PG = 23.4211 \text{ m}^3$$

6.1.7 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS PARA DATOS DEL EXPERIMENTO 1 Y 2 DEL MÉTODO 2 A PARTIR DE PARÁMETROS TEÓRICOS

Ahora se calcula el volumen del tanque de almacenamiento del biogás con la ecuación 6.14 siguiente:

$$VGA = PG * 20\% \dots\dots\dots 6.14$$

Experimento 1. A partir de parámetros teóricos

Sustituyendo valores en la ecuación 6.14 se tiene:

$$VGA = 12.4912 * 20\%$$

Por lo tanto el volumen del tanque de almacenamiento es:

$$VGA = 2.4982 \text{ m}^3$$

Experimento 2. A partir de parámetros teóricos

Sustituyendo valores en la ecuación 6.14 se tiene:

$$VGA = 23.4211 * 20\%$$

Por lo tanto el volumen del tanque de almacenamiento es:

$$VGA = 4.6842 \text{ m}^3$$

En la Tabla 6.5 se muestra el resumen de los cálculos realizados para el Experimento 1 y 2 con Método 2 a partir de parámetros teóricos.

Aquí se puede observar que el volumen de biogás que se estima se genere, está por encima del volumen que se encontró con el cálculo por el Método 1. Sin embargo se puede afirmar que esta variación se debe a que la constante que fue utilizada para calcular la producción diaria de biogás

es relativa y depende de cómo haya sido calculada y bajo qué condiciones estaba la experimentación que arrojó dicho dato.

Tabla 6. 5 Resumen de cálculos de factibilidad realizados por método 2 para los Experimento 1 y 2 (a partir de parámetros teóricos).

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MÉTODO 2 EXPERIMENTO 1	MÉTODO 2 EXPERIMENTO 2
Q: Gasto	m ³ /día	0.0224	0.0224
STD: Sólidos Totales Diarios	kg ST/día	5.67	5.67
STVD: Sólidos Totales Volátiles Diarios	kg STV/día	5.49	5.49
PBp: Producción de biogás diaria promedio	m ³ /día	0.78	0.78
PBmin: Producción de biogás diaria mínima	m ³ /día	1.23	1.23
PBmax: Producción de biogás diaria máxima	m ³ /día	3.50	3.50
VBA: Volumen biogás acumulado considerando la producción diaria promedio	m ³	12.49	23.42
VCH ₄ : Metano acumulado	m ³	6.74	12.64
VA: Volumen del tanque de almacenamiento	m ³	2.49	4.68

6.1.8 FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL CONJUNTO DE RESTAURANTES DE CU SELECCIONADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos de la medición de los RUO de Ciudad Universitaria, se calculará el potencial de generación de biogás de la totalidad de las cafeterías sujetas a estudio.

Todos los cálculos son realizados utilizando el Método 1 de cálculo, debido a que son los datos que pueden arrojar resultados más realistas e implícitamente consideran cada uno de los factores que intervino en la producción de biogás.

Para efectos de cálculo se tomó en cuenta el valor de la producción diaria promedio de RUO en restaurantes de CU, la cual tiene un valor de 426.2 kg/día.

En las Tablas 6.6 y 6.2, se muestran los parámetros a considerar para los cálculos de factibilidad técnica del proyecto

Tabla 6. 6 Parámetros comunes de diseño para digestor de RUO de restaurantes de CU.

DATO	UNIDAD	VALOR
Densidad	kg/m ³	1,414.47
Producción diaria promedio de RUO	Kg	426.25
Volumen de RUO experimental VE	m ³	0.000760002
% de biogás	%	54

A partir de la tabla 6.2 se tomaron los parámetros de diseño específicos del experimento 1 y experimento 2.

Tabla 6. 7 Resumen de cálculos de factibilidad realizados por método 1 (a partir de datos experimentales) para los RUO de los restaurantes de CU.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MÉTODO 1 EXPERIMENTO 1	MÉTODO 1 EXPERIMENTO
Q: Gasto	m ³ /día	0.3014	0.3014
VCarga: Volumen de RUO por Carga	m ³	4.8216	9.0406
V: Volumen del reactor	m ³	11.3450	21.2719
PB: Producción de biogás diaria	m ³ /día	7.2772	7.1373
PG: Volumen Total de Biogás Acumulado	m ³	116.4356	214.1183
VCH ₄ : Metano Acumulado	m ³	62.8752	115.6239
VA: Volumen del tanque de almacenamiento	m ³	23.2871	42.8237
VAL: Volumen de almacenamiento de lodos digeridos	m ³	2.4670	6.3520

6.1.9 CÁLCULO DE LAS OPERACIONES UNITARIAS PARA EL TRATAMIENTO DE RUO DEL CAFESÍN

En la Figura 6.1 se muestran los elementos que conforman el sistema de digestión propuesto, en la Figura 6.2 la ubicación de dicho sistema en la cafetería Cafesín y en la Figura 6.3 la operación de dicho sistema.

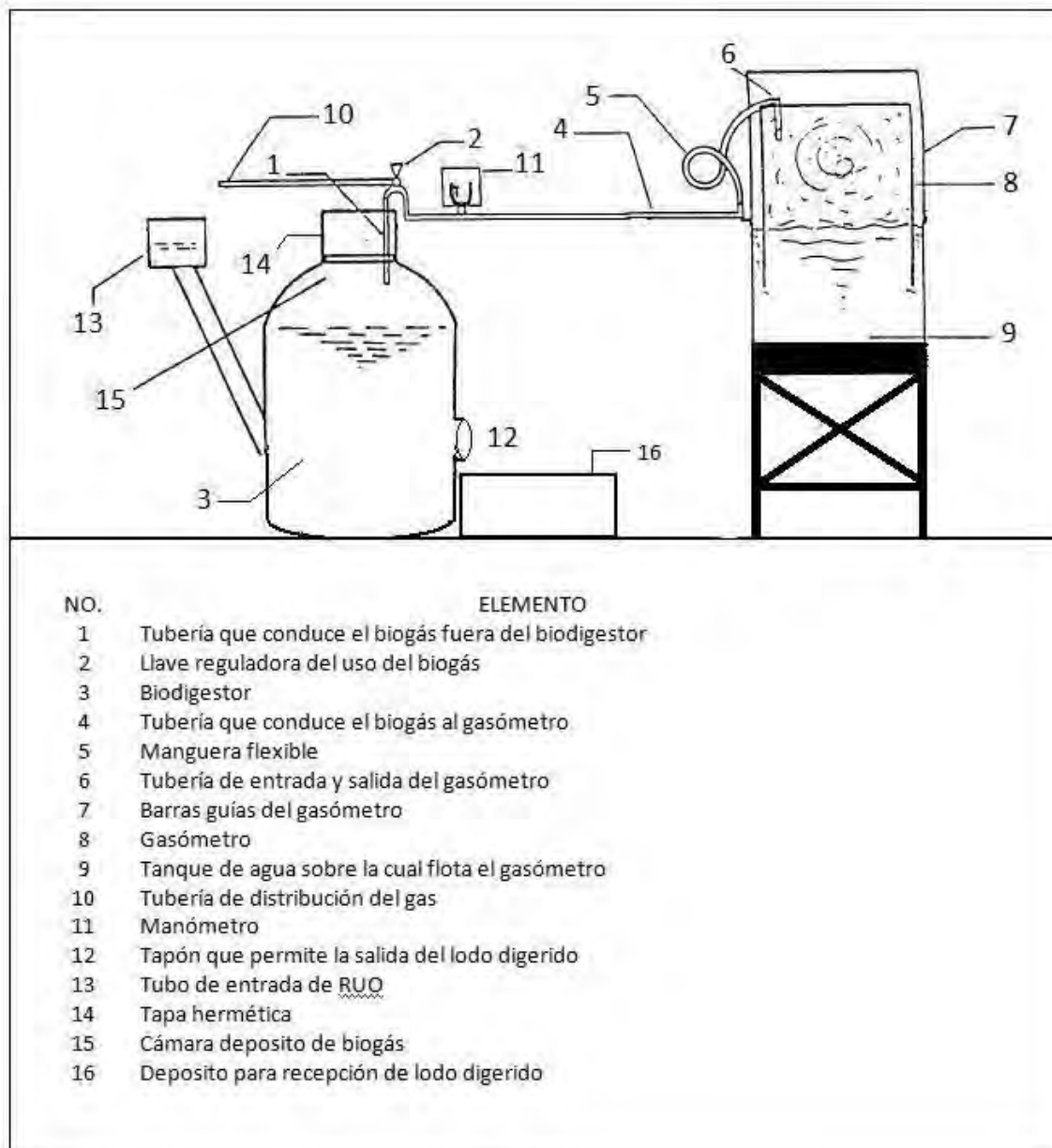


Figura 6. 1 Elementos del sistema de digestión propuesto.

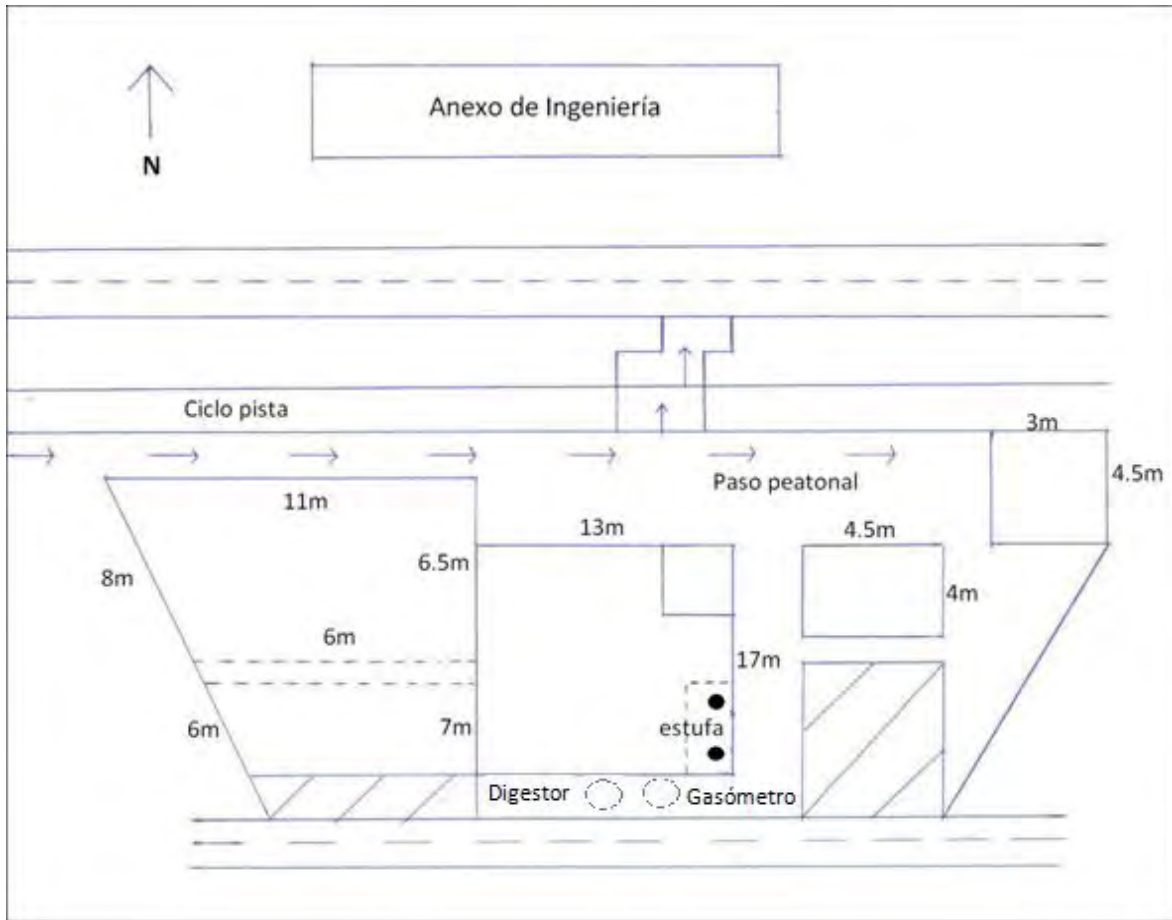


Figura 6. 2 Ubicación del sistema de digestión en la cafetería Cafesin

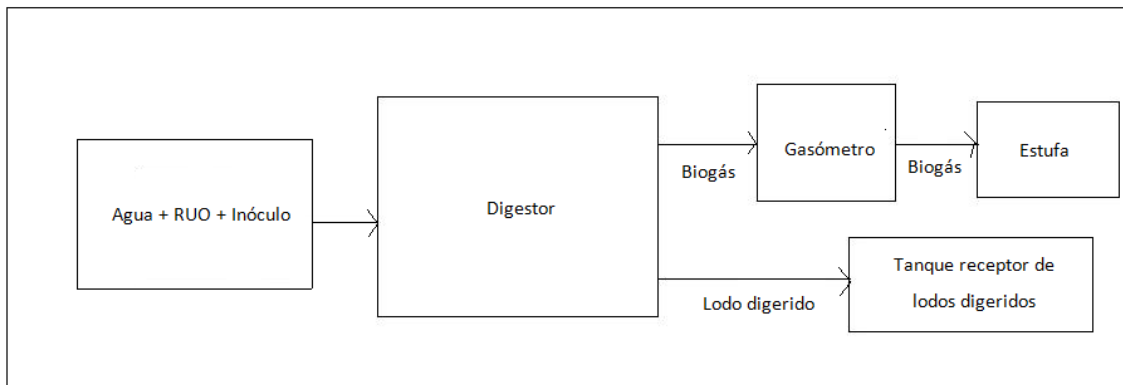


Figura 6. 3 Operación del sistema de digestión propuesto

A partir de la Figura 6.1 y 6.3 se describe la operación del sistema de digestión:

- a. Una vez mezclados los RUO, el inóculo y el agua, entran por el tubo 13 al digestor 3.
- b. La materia orgánica ya degradada (después de 30 días) sale para depositarse en el tanque receptor de lodos digeridos número 12.
- c. El biogás generado por la digestión se conduce al gasómetro por la tubería 4 para adecuar la presión para poder ser utilizado en la cocina.
- d. El biogás pasa por la válvula 4 para ser suministrado para su uso final.

El dimensionamiento del sistema propuesto obedece a los resultados obtenidos para el experimento 2 por el método 1 (a partir de datos experimentales), en la Tabla 6.8 se muestran dichos elementos y sus dimensiones.

Tabla 6. 8 Volúmenes de las operaciones unitarias para el Cafesín.

ELEMENTO	VOLUMEN (m ³)
Digestor	1.5820
Tanque de almacenamiento del biogás	3.1847
Tanque de almacenamiento del lodo digerido	0.4724
OTROS	
Tubería PVC (varias medidas)	
Válvulas: De paso, alivio y presión.	
Virutas de Hierro	
Medidor de Presión	
Gasómetro	

6.1.10 GAS LP AHORRADO ANUALMENTE POR LA CAFETERÍA CAFESÍN

El equivalente de gas LP a biogás se llevará cabo tomando en cuenta los gastos del experimento 2 y los resultados del método 1, ya que son los datos más desfavorables y por tanto el escenario es más realista.

De acuerdo a los datos obtenidos se tiene que el consumo de gas en la cafetería Cafesín ascienden a \$80,000.00 Pesos Mx por año, con lo cual se procedió a calcular el volumen de gas que se consume al año.

Si para el 2009 el costo promedio de gas era de \$5 Pesos Mx por litro, entonces aproximadamente el volumen consumido de gas LP fue de 4,105.7 m³LP/añal.

Dicho dato se cálculo de la siguiente manera:

$$\text{Consumo GLP} = \frac{\text{Gasto anual por concepto de GLP}}{\text{Precio por litro de GLP}} \frac{\$ \text{GLP/año}}{\$ \text{GLP/L}} \dots \dots \dots 6.15$$

Sustituyendo valores:

$$\text{Consumo GLP} = \frac{80,000.00}{5.00} \frac{\$ \text{GLP/año}}{\$ \text{GLP/L}}$$

$$\text{Consumo GLP} = 16,000 \frac{\text{L}}{\text{año}}$$

De acuerdo con la Secretaria de Energía, para poder calcular el volumen de gas LP en m³ se debe utilizar la ecuación 6.16 (SENER, 2010):

$$3.897 * (\text{VLPM3}) = \text{VLP} \dots \dots \dots 6.16$$

Donde:

VLPM3= volumen de gas LP en m³ (metros cúbicos)

VLPL= volumen de gas LP en L (litros)

Nota: El factor (3.897) se obtuvo considerando el Factor de Conversión de Gas L.P. de kilogramos a litros de 0.540, del Acuerdo por el que se fija el precio máximo del Gas L.P. a usuario final para el mes de agosto de 2010, publicado el 30 de julio de 2010 en al Diario Oficial de la Federación.

Este factor de conversión corresponde a la densidad de una mezcla del 42 % de Gas Butano y el 58 % Gas Propano (Chilton, 1962).

Despejando VLPM3 la ecuación queda de la siguiente forma:

$$VLPM3 = \frac{VLPL}{3.897} \dots\dots\dots 6.17$$

Sustituyendo valores en la ecuación 6.17:

$$VLPM3 = \frac{16,000 \frac{L}{año}}{3.897}$$

$$VLPM3 = 4,105.7 \text{ m}^3$$

Por tanto el volumen de gas consumido por la cafetería Cafesín es:

$$\text{Consumo GLP} = 4,105.7 \frac{L}{año}$$

Teniendo la producción anual de biogás producido por los RUO de la cafetería Cafesín resultado del experimento 2 por método 1 la siguiente:

$$PGa = 15.9237 \frac{m^3}{carga} * 9 \frac{carga}{año}$$

$$PGa = 143.3134 \frac{m^3}{año}$$

Donde:

PGa= producción de biogás anual (m³/año)

Ya con este dato y con los poderes caloríficos tanto del gas LP como del biogás, los cuales se muestran en la Tabla 6.8, se determinará la demanda de gas LP cubierta por el biogás, para lo cual se realizan los siguientes cálculos:

Tabla 6. 9 Poder calorífico de gas LP y biogás (Steadman, 1978; FES Iztacala UNAM).

PODER CALORÍFICO (PC)		
TIPO DE GAS	VALOR	UNIDADES
LP	22,390.6	Kcal/m ³
Biogás	5,200	Kcal/m ³

Se calcula el poder calorífico demandado por la cafetería Cafesín en un año, de la siguiente forma:

$$PC\ GLP\ DEMANDADO = 22,390.6 \frac{kcal}{m^3} * 4,105.7 \frac{m^3}{año}$$

$$PC\ GLP\ DEMANDADO = 258,132.393 \frac{K\ cal}{año}$$

Ahora se calcula el poder calorífico generado en un año por el biodigestor calculado con datos del experimento 2, Método 1:

$$PC\ BIOGÁS\ GENERADO = (PC\ biogás \frac{Kcal}{m^3} * Volumen\ anual\ de\ biogás\ generado \frac{m^3}{año}) \dots\dots\dots 6.18$$

Por tanto el poder calorífico del biogás generado en un año es:

$$PC\ BIOGÁS\ GENERADO = 5,200 \frac{K\ cal}{m^3} * 143.3134 \frac{m^3}{año}$$

$$PC\ BIOGÁS\ GENERADO = 745,230.1395 \frac{K\ cal}{año}$$

Realizando la comparación entre lo que demanda la cafetería y lo que se produce, se puede determinar que el biogás generado por el digestor propuesto cubre muy bien las necesidades energéticas de la cafetería anualmente, el 280.7 % de la demanda energética del Cafesín, y por lo tanto presenta excedentes del 180.7 % de poder calorífico.

Con lo anterior queda expresada la factibilidad técnica de generara biogás para ser utilizado por el Cafetería Cafesín del Anexo de Ingeniería en CU.

6.2 FACTIBILIDAD AMBIENTAL

La actividad humana ha provocado un notable aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Se prevé que de este aumento resulte, en las próximas décadas, un calentamiento de la superficie terrestre y, como consecuencia, un cambio climático. Por ello, los países industrializados han acordado, en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Protocolo de Kioto), reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los gases que favorecen en mayor medida ese efecto son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O); los tres gases se producen, también, en la eliminación de residuos.

Los costos de captura y transformación temprana y eficaz de dicho gas sobrepasan ampliamente los costos de inacción o del diferimiento, ya que la funcionalidad de la atmósfera se verá comprometida mucho antes de que se agoten los combustibles fósiles, ya que bajo el escenario actual del nivel de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), los ecosistemas tendrán un pico en su capacidad de captura de CO_2 a mediados del presente siglo e irán declinando hasta convertirse en generadores netos de CO_2 ; por lo cual México estima una reducción de 50% para el 2050, respecto al 2000, en esta trayectoria deseable de reducción, las emisiones mexicanas tendrían que alcanzar un punto de inflexión antes del 2012, para después descender paulatinamente hasta alcanzar el nivel indicado en 2050.

Cabe señalar que los beneficios de captura y transformación de CH_4 no son únicamente ambientales, ya que dichas acciones también traen beneficios económicos, por medio de los Certificados de Reducción de Emisiones CERs los cuales son producto de los llamados MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio), que son proyectos de tecnologías limpias financiados por países desarrollados para la reducción de GEI, dichos proyectos son implementados en países en

desarrollo, los cuales entregan al país desarrollado un certificado de reducción de emisiones llamado Certificado de Emisiones Reducidas (CERs), el cual se cotiza en dólares .

En la Tabla 6.10 se reflejan las emisiones de estos gases estimadas en México para el año 2002 para la proporción procedente de la disposición final de residuos (GTZ, 2003).

El impacto de la gestión de residuos sólidos sobre el efecto invernadero se debe fundamentalmente al metano, que se produce por la descomposición de residuos biodegradables en condiciones anaerobias en los rellenos sanitarios. Aproximadamente el 87 % del CH_4 , el 16% de N_2O y el 0.04% de CO_2 , emitidos a la atmósfera son generados por esta fuente. Por esta razón, la reducción de emisiones de CH_4 de los rellenos sanitarios representa un potencial para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el ámbito de la gestión de residuos sólidos (GTZ, 2003).

El aprovechamiento energético del biogás generado a partir de la fermentación de las basuras entraña beneficios ambientales añadidos ya que, en el caso de los rellenos sanitarios, por ejemplo, se impiden que estos gases se escapen de manera incontrolada a la atmósfera. Y es que conviene recordar que el ingrediente más abundante de estos gases es el metano, que además de ser peligroso por su inflamabilidad es uno de los gases de efecto invernadero más potentes ya que su incidencia es 21 veces superior a la del CO_2 en la atmósfera, lo que hace que deba tenerse muy en cuenta a la hora de abordar el problema del cambio climático. Generar energía con biogás ayuda, además, a eliminar los malos olores asociados a esas mismas emisiones, lo cual, aunque problema menor, no deja de ser otro elemento positivo.

Tabla 6. 10 Estimación de Gases de Efecto Invernadero, en México para el 2002 (GTZ, 2003).

ESTABLECIMIENTO	CO ₂ (Mg/año)	CH ₄ (Mg/año)	N ₂ O Mg/año)	NO _x (Mg/año)	CO (Mg/año)	COVNM (Mg/año)	SO ₂ (Mg/año)	HFC (Mg/año)	PFC (Mg/año)	SF ₆ (Mg/año)
122 - (4B) MANEJO DE ESTIÉRCOL	0	54,973.7	0	0	0	0	0	0	0	0
211 - (6) RESIDUOS	101,996	3,025,106	6,306.9	0	0	0	0	0	0	0
212 - (6A) DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN SUELO	0	1,664,791	0	0	0	0	0	0	0	0
213 - (6A1) DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN SUELO EN RELLENOS SANITARIOS	0	1,109,861	0	0	0	0	0	0	0	0
214 - (6A2) DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN TIRADEROS CLANDESTINOS	0	208,099	0	0	0	0	0	0	0	0
220 - (6C) INCINERACIÓN DE RESIDUOS	101,996	0	14.9	0	0	0	0	0	0	0
TOTALES GENERADAS POR RESIDUOS	203,992	6,062,830.7	6,321.8	0	0	0	0	0	0	0
TOTALES (TODOS LOS SECTORES)	480,409,448	6,932,654	39,815	1447292	8,024,096	1,681,184	2,624,712	3,107.4	60.06	0.6349
PORCENTAJE DE LAS GENERADAS POR RESIDUOS (%)	0.04246211	87.45	15.87	0	0	0	0	0	0	0

Mg equivale a Megagramo o Tonelada métrica.

6.2.1. OTRAS VENTAJAS DE GENERAR ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA.

Dentro de las ventajas más importantes de generar energía a partir de la biomasa, se encuentran las siguientes:

1. Balance neutro en emisiones de CO₂ (principal responsable del efecto invernadero). Para el Protocolo de Kyoto, la biomasa tiene un factor de emisión de dióxido de carbono (CO₂) igual a cero. La combustión de biomasa produce agua y CO₂, pero la cantidad emitida de dióxido de carbono fue captada previamente por las plantas durante su crecimiento. Es decir, el CO₂ forma parte de un flujo de circulación natural entre la atmósfera y la vegetación por lo que no representa un incremento en las emisiones de CO₂. Su uso contribuye a reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera siempre y cuando sustituya a un combustible fósil (GTZ, 2007).
2. Al tener escaso o nulo contenido en azufre, la combustión de la biomasa no produce óxidos de este elemento, causantes de las lluvias ácidas, como ocurre en la quema de combustibles fósiles.
3. En el caso de los biocarburantes utilizados en motores, las emisiones contienen menos partículas sólidas y menor toxicidad que las emisiones producidas por carburantes procedentes del petróleo.
4. Permite recuperar en las cenizas de la combustión importantes elementos minerales de valor fertilizante, como fósforo y potasio.
5. Como una parte de la biomasa procede de residuos que es necesario eliminar, su aprovechamiento energético supone convertir un residuo en un recurso (Fernández, 2008 a).

Ya para finalizar se debe señalar que en el caso de la quema de biogás, los contaminantes que se generan son CO y NOX principalmente (CNE y GTZ, 2007).

6.2.2 EMISIONES DE GEI EVITADAS POR LA CAFETERÍA CAFESÍN EN UN AÑO

Para conocer las toneladas anuales de CO₂ evitadas, se procedió a realizar los siguientes cálculos: Antes que nada se debe calcular el volumen de biogás a presión y temperatura estándar ya que los programas que realizan las equivalencias entre CH₄ y CO₂ especifican que el V de CH₄ debe considerarse a P y T estándar.

Para efectos de toneladas de CO₂ evitadas para la cafetería Cafesín del Anexo de Ingeniería, se seleccionó el Experimento 2 en el cual el TRH fue de 30 días y el volumen de biogás aproximado fue de 15.9237 m³ de biogás por carga, lo que se traduce a que anualmente el volumen de CH₄ es de **191.0846** m³ de biogás/año, así mismo se tomó la temperatura promedio para dicho experimento la cual fue de 21.64 °C y una presión de 586 mm Hg la cual corresponde a la presión de la Ciudad de México.

De acuerdo con la literatura las condiciones de P y T estándar son las siguientes:

$$P=1\text{atm}$$

$$T=273\text{K}$$

Por lo anterior se procedió a utilizar la ley de los gases para calcular el volumen del gas generado a P y T estándar.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \dots\dots\dots 6.19$$

$$V_1 = \frac{P_2 V_2 T_1}{T_2 P_1} \dots\dots\dots 6.20$$

Donde:

$$P_1 = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg}$$

$$T_1 = 273 \text{ K}$$

$$P_2 = 586 \text{ mm Hg}$$

$$T_2 = 294.79 \text{ K}$$

$$V_2 = 143.3134 \text{ m}^3/\text{año}$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$V_1 = \frac{586 * 143.3134 * 273}{294.79 * 760}$$

Por lo tanto el Volumen de biogás generado a P y T estándar es:

$$V_1 = 102.3342 \text{ m}^3/\text{año}$$

Ya que se tiene el volumen de biogás generado se procede a calcular la porción de CH₄ que dicho biogás contiene; de acuerdo a la literatura se sabe que la porción de metano en el biogás es de 54%, por lo cual el volumen mínimo de CH₄ es:

$$V_{\text{CH}_4} = V_1 * 0.54 \text{ m}^3/\text{año}$$

Sustituyendo valores se tiene lo siguiente:

$$V_{\text{CH}_4} = 102.3342 * 0.54 \text{ m}^3/\text{año}$$

Por lo tanto la cantidad de metano producido en un año es:

$$V_{\text{CH}_4} = 55.2604 \text{ m}^3/\text{año}$$

Ya contando con este dato se procede a llevarlo a la EPA Interactive Units Converter, en donde se obtendrá la cantidad de Metano en toneladas métricas, las cuales son necesarias para el cálculo de toneladas métricas equivalentes de CO₂ que son evitadas (EPA a , 2010).

Realizando el cálculo en dicho sitio se obtiene que el volumen anterior equivale a:

$$V_{\text{CH}_4} = 55.2604 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} = 0.03758 \frac{\text{toneladas métricas de CH}_4}{\text{año}}$$

Ahora si se procede a introducir dichos datos en el sitio Greenhouse Gas Equivalencies Calculator y se obtiene de esta forma las toneladas de CO₂ equivalentes evitadas al llevar a cabo dicho proyecto (EPA b , 2010).

$$0.03758 \frac{\text{toneladas métricas de CH}_4}{\text{año}} = 0.789 \frac{\text{toneladas métricas de CO}_2}{\text{año}}$$

$$\text{CO}_2 \text{ evitadas} \frac{\text{toneladas métricas de CO}_2}{\text{año}} = 0.789 \frac{\text{toneladas métricas de CO}_2}{\text{año}}$$

Para darse una idea, dichas emisiones evitadas representan (U.S. Environmental Protection Agency (EPA)b , 2010):

El CO₂ emitido por 88.8 galones de gasolina consumidos.

El CO₂ emitido por 1.8 barriles de petróleo consumido.

El CO₂ emitido de la electricidad utilizada por 0.096 casas al año.

El CO₂ emitido del consumo de energía utilizada por 0.067 casas en un año.

El CO₂ emitido por 32.9 cilindros de propano utilizado para hacer barbacoa en casa.

El CO₂ secuestrado por 20.2 árboles plantados y cultivados por 10 años.

El CO₂ secuestrado anualmente por 0.168 hectáreas de pinos o abetos.

El CO₂ secuestrado por 0.007 hectáreas de bosques preservados de la deforestación.

Evitar la emisión de GEI mediante el reciclado de 0.266 toneladas de residuos no enviados a rellenos sanitarios.

A pesar de que estas emisiones evitadas no representan mucho en dinero, el beneficio ambiental es evidente y si se pudiera instalar un digestor por cada cafetería, los beneficios serían más que excelentes.

Bien se puede decir que lo que importa es contribuir con el mejoramiento del medio ambiente y en caso de que se pudiera conseguir beneficios económicos sería tan sólo un plus.

6.2.3 EMISIONES DE GEI EVITADAS ANUALMENTE POR LA SUMA DE RUO GENERADOS EN LOS RESTAURANTES DE CU SELECCIONADOS.

Para conocer las toneladas anuales de CO₂ evitadas por el tratamiento de RUO de restaurantes de CU, se procedió a realizar los mismos cálculos que se realizaron para la cafetería cafésín y los resultados se citan a continuación:

Para efectos de toneladas de CO₂

evitadas para restaurantes de CU, al igual que en la cafetería Cafésín, se seleccionó el Experimento 2 en el cual el TRH fue de 30 días, el volumen de CH₄ aproximado para la cantidad de residuos generados por el conjunto de restaurantes fue de 214.1183 m³ de biogás por carga, lo que se traduce a que anualmente el volumen de CH₄ es de 1927.0650 m³ de CH₄/año, así mismo se tomó

la temperatura promedio para dicho experimento la cual fue de 21.64 °C y una presión de 586 mm Hg la cual corresponde a la presión de la Ciudad de México.

Tomando en cuenta todos los aspectos anteriores los resultados son los siguientes:

El Volumen de biogás generado a P y T estándar es:

$$V_1 = 1376.0375 \text{ m}^3/\text{año}$$

La cantidad de metano producido en un año es:

$$V_{\text{CH}_4} = 743.0602 \text{ m}^3/\text{año}$$

Llevando dicho dato a la EPA Interactive Units Converter se obtiene que el volumen anterior equivale a:

$$V_{\text{CH}_4} = \frac{\text{m}^3}{\text{año}} = 0.50542 \frac{\text{toneladas métricas de CH}_4}{\text{año}}$$

Ahora si se procede a introducir dichos datos en el sitio Greenhouse Gas Equivalencies Calculator y se obtiene de esta forma las toneladas de CO₂ equivalentes evitadas al llevar a cabo dicho proyecto (EPA a, 2010).

$$1.05215 \frac{\text{toneladas métricas de CH}_4}{\text{año}} = 10.6 \frac{\text{toneladas métricas de CO}_2}{\text{año}}$$

$$\text{CO}_2 \text{ evitadas} \frac{\text{toneladas métricas de CO}_2}{\text{año}} = 10.6 \frac{\text{toneladas métricas de CO}_2}{\text{año}}$$

Para darse una idea, dichas emisiones evitadas representan (EPA b , 2010):

El CO₂ emitido por 1,194 galones de gasolina consumidos.

El CO₂ emitido por 24.7 barriles de petróleo consumido.

El CO₂ emitido de la electricidad utilizada por 1.3 casas al año.

El CO₂ emitido del consumo de energía utilizada por 0.903 casas en un año.

El CO₂ emitido por 442 cilindros de propano utilizado para hacer barbacoa en casa.

El CO₂ secuestrado por 272 árboles plantados y cultivados por 10 años.

El CO₂ secuestrado anualmente por 2.3 hectáreas de pinos o abetos.

El CO₂ secuestrado por 0.101 hectáreas de bosques preservados de la deforestación.

Evitar la emisión de GEI mediante el reciclado de 3.6 toneladas de residuos no enviados a rellenos sanitarios.

A pesar de que estas emisiones evitadas no representan mucho en dinero, el beneficio ambiental es evidente y si se pudiera instalar un digestor por cada cafetería, los beneficios serían más que excelentes.

Bien se puede decir que lo que importa es contribuir con el mejoramiento del medio ambiente y en caso de que se pudiera conseguir beneficios económicos sería tan sólo un plus.

6.3 FACTIBILIDAD POLÍTICA

En la actualidad el interés de México por contribuir a la reducción de emisiones de GEI es evidente, sin embargo el hecho de que este tema sea nuevo para nuestro país, hace que la creación de nuevas leyes y su aplicación sea en cierta forma dificultosa, ya que no se tienen las bases y regulación necesarias respectivamente, para llevar a cabo dichos proyectos de reducción de emisiones, lo cual provoca que la aplicación de las leyes sea parcial, dando como resultado el cumplimiento tardío de las metas propuestas, y en el peor de los casos la anulación de las mismas.

Por otro lado cabe destacar que la falta de profesionales en el ramo, así como la desinformación de la población, hace que todos los apoyos económicos y tecnológicos que ofrecen al país gobiernos y entidades privadas, nacionales e internacionales, sean desaprovechados y como consecuencia el uso de mal uso de los mismos.

Prueba de que México está incursionando en mejoramiento del medio ambiente son los siguientes artículos incluidos en leyes que ya han sido aprobadas en nuestro país en el ámbito de emisiones, medio ambiente y energías renovables.

Una de las más importantes leyes y muy poco difundida, es la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal; dicha ley es la base que se necesita para llevar a cabo de manera exitosa los proyectos de producción de biogás, y pues no sólo eso, también nos ayudaría, a coleccionar de manera separada los artículos que son reciclables dando como resultado la no emisión de una porción de los GEI producidos por los residuos sólidos, además, contribuiría a al no sobreexplotación de espacio en rellenos sanitarios.

Dentro de esta ley se encuentran los siguientes artículos que a criterio de ésta tesis son de los más importantes que contiene esta Ley:

Art. 14. La secretaría de obras y servicios, en coordinación con la secretaría de medio ambiente del D.F. y las secretarías de desarrollo económico y de finanzas, promoverá instrumentos económicos para aquellas personas que desarrollen acciones de prevención, minimización y valorización, así como para inversión en tecnología y utilización de prácticas, métodos o procesos que coadyuven a mejorar el manejo integral de los residuos sólidos.

Art. 56. La secretaria de obras y servicios, en coordinación con la secretaria de medioambiente del DF y la secretaría de desarrollo económico, instrumentarán programas para la utilización de materiales o subproductos provenientes de los residuos sólidos.

Art. 61. La secretaría de obras y servicios diseñará, construirá, operará y mantendrá centros de composteo o de procesamiento de residuos urbanos orgánicos, de conformidad con lo que establece el Programa de Gestión Integral de los residuos sólidos y el programa de prestación del servicio de limpia correspondiente. Las delegaciones podrán encargarse de las actividades señaladas.

Art. 63. Los controles sobre las características apropiadas de los materiales para la producción de compost o criterios para cada tipo de compost, se fijarán en el reglamento, debiendo identificar las particularidades de los tipos de que por sus características pueda ser comercializada o donada. El compost que no pueda ser aprovechada deberá ser enviada a los rellenos sanitarios para su disposición final.

Cabe destacar que en esta Ley se establecen variados lineamientos que rara vez se llevan a cabo, sin embargo están plasmados ahí y son los siguientes y se mencionan debido a la importancia que representan:

Art. 25. Queda prohibido: arrojar o abandonar en la vía pública, residuos de cualquier especie; depositar animales muertos, residuos sólidos que despidan olores desagradables o aquellos provenientes de la construcción en los contenedores instalados en la vía pública para el arrojamiento temporal de residuos sólidos de los transeúntes; quemar a cielo abierto o en lugares no autorizados, cualquier tipo de los residuos sólidos; arrojar o abandonar en lotes baldíos, a cielo abierto o en cuerpos de aguas superficiales o subterráneas, sistemas de drenaje, alcantarillado o en fuentes públicas, residuos sólidos de cualquier especie; pepenar residuos sólidos de los recipientes instalados en la vía pública y dentro de los sitios de disposición final y sus alrededores; instalar contenedores de los residuos sólidos en lugares no autorizados; fijar propaganda comercial o política en el equipamiento urbano destinado a la recolección de los residuos sólidos, así como fijar en los recipientes u otro mobiliario urbano destinado al depósito y recolección colores alusivos a algún partido político; fomentar o crear basureros clandestinos; confinar residuos sólidos fuera de los sitios destinados para dicho fin; tratar térmicamente los residuos sólidos recolectados, sin considerar las disposiciones jurídicas aplicables; diluir o mezclar residuos sólidos o industriales peligrosos en cualquier líquido y su vertimiento al sistema de alcantarillado, a cualquier cuerpo de agua o sobre suelos con o sin cubierta vegetal; mezclar residuos peligrosos con residuos sólidos e industriales no peligrosos; confinar o depositar en sitios de disposición final residuos en estado líquido o con contenidos líquidos que excedan los máximos permitidos por las NOM o las normas ambientales del D.F.

Art. 33. Todo generador de residuos sólidos debe separarlos en orgánicos e inorgánicos.

Art. 34. La secretaría de obras y servicios y las delegaciones, en el marco de sus respectivas competencias, instrumentaran los sistemas de depósito y recolección separada de los residuos sólidos, así como de aprovechamiento, tratamiento y disposición final.

Art. 39. Los camiones recolectores y de transferencia deberán contar con contenedores seleccionados conforme a la separación.

Art. 51. Los sitios de disposición final tendrán un acceso restringido a materiales reutilizables o reciclables y deberá recibir un menor porcentaje de residuos orgánicos. Además, emplearán

mecanismos para instalar sistemas de extracción de biogás y tratamiento de lixiviados para su recolección.

Art. 52. Queda prohibida la selección o pepena de los residuos sólidos en los sitios destinados para relleno sanitario.

Art. 54. Los rellenos sanitarios que hayan cumplido su vida útil se destinarán únicamente como parques, jardines, centros de educación ambiental o sitios para el fomento de la cultura y recreación.

Art. 61. La secretaría de obras y servicios diseñará, construirá, operará y mantendrá centros de composteo o de procesamiento de residuos urbanos orgánicos, de conformidad con lo que establece el Programa de Gestión Integral de los residuos sólidos y el programa de prestación del servicio de limpia correspondiente. Las delegaciones podrán encargarse de las actividades señaladas.

Art. 65. Es responsabilidad de toda persona que genere y maneje residuos sólidos, hacerlo de manera que no implique daños a la salud humana ni al ambiente. Cuando la generación, manejo y disposición final de los residuos sólidos produzca contaminación del suelo, independientemente de las sanciones penales o administrativas que procedan, quien preste el servicio está obligado a: llevar a cabo las acciones necesarias para restaurar y recuperar las condiciones del suelo; y en caso de que la recuperación o restauración no fueran factibles, a indemnizar por los daños causados a terceros o al ambiente.

Art. 66. Las autoridades competentes podrán aplicar las siguientes medidas de seguridad cuando las actividades para la gestión de residuos representen riesgos significativos para la salud humana o el ambiente: asegurar los materiales, residuos o sustancias contaminantes; asegurar, aislar, suspender o retirar temporalmente en forma parcial o total, según corresponda, los bienes, equipos y actividades que generen riesgo significativo o daño; y clausurar temporal, parcial o totalmente las instalaciones en que se manejen o se preste el servicio; y suspender las actividades, en tanto no se mitiguen los daños causados. Se podrá solicitar el auxilio de la fuerza pública para ejecutar cualquiera de las acciones anteriores.

Por otro lado se cuenta con la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, de la cual se extrajeron los puntos de interés para dicha tesis.

Dentro de esta ley en su Artículo 2, se considera a los bioenergéticos como los combustibles obtenidos de la biomasa proveniente de las actividades agrícola, pecuaria, silvícola, alga cultura, residuos de la pesca, domesticas, comerciales, industriales, de microorganismos, y de enzimas, así como sus derivados, producidos, por procesos tecnológicos sustentables que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas por la autoridad.

Dentro del ámbito de apoyo para la realización de proyectos de bioenergéticos se tiene el Art. 17, 19 y 25 los cuales establecen lo siguiente:

Art. 17. Para impulsar, desarrollar e incentivar la producción de los bioenergéticos, las secretarías y los gobiernos promoverán la creación de infraestructura para la producción de bioenergéticos. Los incentivos estarán dirigidos a personas que contribuyan al desarrollo de la industria de los bioenergéticos. Así mismo consideraran a aquellas personas que realicen investigaciones de tecnología, cuya aplicación disminuya la generación de emisiones contaminantes.

Art. 19. La SAGARPA y la SENER apoyarán la investigación científica y tecnológica, así como la capacitación, siendo sus propósitos: fomentar y desarrollar la investigación científica para la producción sustentable de insumos y para la producción distribución, y uso de los bioenergéticos; establecerán procedimientos de evaluación para determinar el estado de la viabilidad de los proyectos; determinarán las condiciones en las que se deben producir los bioenergéticos, de manera que se lleven a cabo en equilibrio con el medio ambiente.

Art. 23. El ejecutivo federal, a través de sus dependencias y entidades, en el ámbito de sus respectivas competencias, podrá celebrar convenios con los sectores público, social y privado para impulsar la investigación científica y tecnológica y la capacitación en materia de bioenergéticos y de sus insumos.

Citados los artículos anteriores queda muy claro que existe apoyo por parte del gobierno para llevar a cabo proyectos de energías renovables y que lo único que nos queda hacer es buscar la forma de acceder a ellos y saber aprovecharlos de manera correcta.

Además de lo anterior debemos enterarnos más de las leyes que rigen nuestro país para que de esta manera llevemos a cabo las acciones que se establecen ahí; mientras tanto, el gobierno debe de ser riguroso en cuanto a la aplicación de las mismas, porque como vulgarmente se dice “Con

tener ganas, no es suficiente". Ya que los beneficios que traería la correcta aplicación de las leyes serían muchos y sumados harían de México un mejor país.

6.4 FACTIBILIDAD ECONÓMICA

Antes de realizar un proyecto de inversión es necesario evaluarlo financieramente para averiguar si es bueno realizar el proyecto o no es aconsejable; y los parámetros que contribuyen a dicho análisis son VPN y TIR.

6.4.1 VALOR PRESENTE NETO

El valor presente neto VPN, es el más utilizado porque pone en pesos de hoy tanto los ingresos futuros como los egresos futuros, lo cual facilita la decisión desde el punto de vista financiero, de realizar o no un proyecto. Al usar el VPN hay que recordar que los ingresos se toman con el signo positivo y en la línea del tiempo estarán ubicados en la parte superior y los egresos se tomarán con el signo negativo y estarán ubicados en la línea de tiempo hacia abajo.

Si el $VPN > 0$ el proyecto es bueno, porque en pesos de hoy, los ingresos son mayores que los egresos, si el $VPN < 0$ significa que en pesos de hoy los ingresos son menores que los egresos y por lo tanto el proyecto no debe realizarse, y si el $VPN = 0$ los ingresos serán iguales a los egresos y financieramente le será indiferente al inversionista.

Desde el punto de vista matemático el VPN es la sumatoria de los flujos de caja puestos en el día de hoy, lo cual podemos representar por (Baca, 2005):

$$VPN = \sum F_n (1+i)^{-n} = F_0 + F_1(1+i)^{-1} + F_2(1+i)^{-2} + \dots + F_n(1+i)^{-n} \dots \dots \dots 6.21$$

Donde i es la tasa a la cual son descontados los flujos de caja, esa tasa i la denominaremos TIO.

La tasa de de interés de oportunidad (TIO), es la tasa de interés más alta que un inversionista sacrifica con el objeto de realizar un proyecto (Baca, 2005).

6.4.1.1 CÁLCULO DEL VALOR PRESENTE NETO DEL PROYECTO PROPUESTO

En la Tabla 6.11 se muestran los costos desglosado de los suministros, mano de obra y puesta en marcha de la instalación del sistema de digestión propuesto para la cafetería Cafesín.

Tabla 6. 11 Costos de suministros, mano de obra y puesta en marcha del sistema de digestión.

SISTEMA DE DIGESTIÓN		
ELEMENTO	VOLUMEN (m ³)	PRECIO
Digestor	1.58	\$54,275
Tanque de almacenamiento del biogás con gasómetro	3.18	\$85,766
Tanque de almacenamiento del lodo digerido	0.47	\$1,178
OTROS		
Tubería PVC (varias medidas)		\$2,188
Mislaneos		\$4,302
Mano de Obra		\$5,000
Puesta en marcha		\$1,000
TOTAL		\$153,709

Se estima que la vida útil del sistema de digestión es de 8 años (lo cual tiene como referencia el tiempo de vida de los materiales seleccionados), por lo cual se procederá a calcular los flujos de efectivo de dichos años.

En la Tabla 6.12 se presentan los porcentajes promedio del incremento en el precio del gas LP y en la Tabla 6.13 se muestra el precio promedio anual del gas LP para los siguientes 8 años (el cálculo de estos precios se realizó utilizando el 9 % de incremento en el precio del gas LP mostrado en la Tabla 6.12).

Tabla 6. 12 Porcentaje de incremento en el precio promedio anual del gas LP

% DE INCREMENTO EN EL PRECIO PROMEDIO DEL GAS LP		
AÑO	PRECIO PROMEDIO DEL GAS LP \$/KG	% DE INCREMENTO/AÑO
2001	4.76	-
2002	5.19	0.09
2003	6.40	0.23
2004	7.09	0.11
2005	8.50	0.20
2006	8.97	0.06
2007	9.34	0.04
2008	9.70	0.04
2009	9.17	-0.05
% Incremento		0.09

Tabla 6. 13 Estimación del precio promedio anual estimado para el gas LP

NO. DE AÑO	AÑO	PRECIO PROMEDIO ESPERADO DEL GAS LP \$/L
0	2010	5.45
1	2011	5.93
2	2012	6.46
3	2013	7.04
4	2014	7.66
5	2015	8.34
6	2016	9.09
7	2017	9.89
8	2018	10.77

Se considera que el número de cargas anuales es de 9 ya que son el número de meses en los que se encuentra activa la cafetería. Y se determina que el costo de operación y mantenimiento de dicho sistema es de 20,000 (\$/año) con un incremento anual del 5%.

Por tanto los costos de operación y mantenimiento del sistema para los 8 años de vida útil quedan como se muestra en la tabla 6.14.

Tabla 6. 14 Estimación del costo de operación y mantenimiento del sistema de digestión.

NO. DE AÑO	AÑO	COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO \$/AÑO
0	2010	0
1	2011	15,000
2	2012	15,750
3	2013	16,538
4	2014	17,365
5	2015	18,233
6	2016	19,145
7	2017	20,102
8	2018	21,107

Como se vio en el apartado 6.1.9 el volumen de gas LP que consume la cafetería Cafesín es de 16,000 (L/año) y el porcentaje de gas LP que será sustituido por biogás es de 280.7 %, con estos datos y los precios de la Tabla 6.13 se calcula el gasto por concepto de gas LP del Cafesín y las ganancias debidas a la implementación del sistema de digestión. En la tabla 6.15 se observan los resultados de dichos cálculos.

Tabla 6. 15 Ganancia monetaria por producción de biogás en el Cafesín

NO. DE AÑO	AÑO	GASTO POR CONCEPTO DE GAS LP \$/AÑO	GANANCIA POR EXCEDENTES DE BIOGAS \$/AÑO
0	2010	87,200	0
1	2011	94,955	266,539
2	2012	103,400	290,244
3	2013	112,595	316,054
4	2014	122,609	344,163
5	2015	133,512	374,768
6	2016	145,386	408,099
7	2017	158,316	444,393
8	2018	172,395	483,913

Reuniendo los datos anteriores se procede a realizar el cálculo de los flujos de efectivo tomando como positivos los ingresos y como negativos los egresos. En la Tabla 6.16 se muestran los flujos de efectivo resultantes para cada año de vida del proyecto.

Tabla 6.16 Flujos de efectivo del proyecto

NO. DE AÑO	AÑO	INGRESOS \$/AÑO	EGRESOS \$/AÑO	FLUJO DE EFECTIVO \$/AÑO
0	2010	0	-153,709	-153,709
1	2011	94,955	-15,000	79,955
2	2012	103,400	-15,750	87,650
3	2013	112,595	-16,538	96,058
4	2014	122,609	-17,364	105,244
5	2015	133,512	-18,233	115,280
6	2016	145,386	-19,144	126,242
7	2017	158,316	-20,101	138,214
8	2018	172,395	-21,107	151,289

En la figura 6.4 se muestra el diagrama de flujos de efectivo de los 8 años de vida del proyecto.

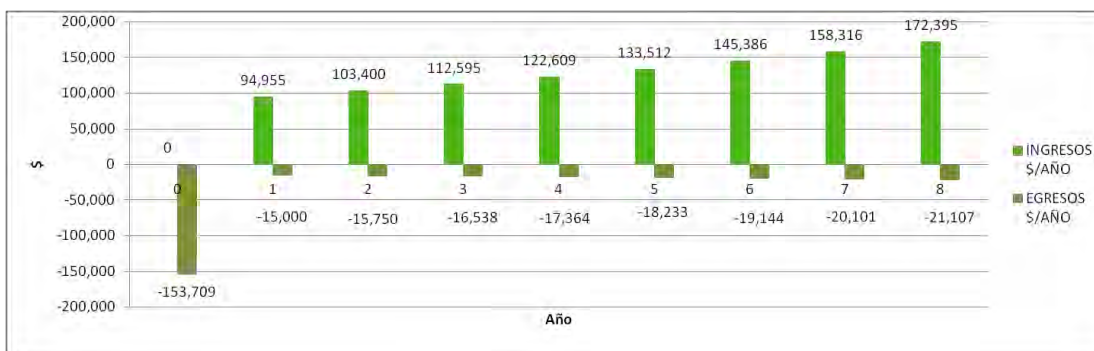


Figura 6.4 Diagrama de flujos de efectivo del proyecto en el Cafesín.

Considerando que la tasa de interés de oportunidad es del 3% se procede a realizar el cálculo del VPN del proyecto en el Cafesín. Sustituyendo valores en la ecuación 6.21 queda:

$$\text{VPN} = -153,709 + 79,955 (1+0.03)^{-1} + 87,650 (1+0.03)^{-2} + 96,058 (1+0.03)^{-3} + 105,244 (1+0.03)^{-4} + 115,280 (1+0.03)^{-5} + 126,242 (1+0.03)^{-6} + 138,214 (1+0.03)^{-7} + 151,289 (1+0.03)^{-8}$$

Por tanto el VPN tiene un valor de:

$$\text{VPN} = \$624,926$$

Como el $\text{VPN} > 0$ se puede determinar que el proyecto si se puede realizar, porque en pesos de hoy además de ganarse el 3% se obtiene una ganancia de \$624,926.

6.4.2 TASA INTERNA DE RETORNO TIR

La tasa interna de retorno que se representa por TIR es uno de los índices que más aceptación tiene dentro del público porque mide la rentabilidad de una inversión, sin embargo, dentro de los especialistas no tiene la misma aceptación porque se presta a muchos errores. Hay ocasiones que la decisión que se tome con el VPN no coincide con la decisión que se tome con la TIR. Cuando esto ocurre es porque la TIR no se ha aplicado correctamente y en tales circunstancias será necesario utilizar otra técnica hasta hacer que los resultados obtenidos con la TIR coincidan con los resultados que se obtengan con el VPN.

Financieramente la TIR es la tasa a la cual son descontados los flujos de caja de forma tal que los ingresos y los egresos sean iguales; desde el punto de vista matemático la TIR es la tasa a la cual el VPN se hace cero.

Existen dos clases de flujos de caja: los flujos convencionales y los flujos no convencionales y los flujos no convencionales.

Los flujos convencionales son aquellos donde primero aparecen los egresos y después aparecen los ingresos y viceversa.

Los flujos no convencionales son aquellos donde figuran intercalados los ingresos y los egresos.

6.4.2.1 CÁLCULO DEL LA TIR DEL PROYECTO

Tomando en cuenta que la TIR es la tasa a la cual el VPN=0, se procede de la siguiente manera.

Para poder calcular la TIR se requiere interpolar, para ellos se requieren dos valores para la TIO no muy alejados entres si de tal forma que la función del VPN sea una vez positiva y una vez negativa:

1. Seleccionando una tasa de interés del 58% el VPN resulta positivo como se muestra a continuación:

$$\text{VPN} = 153,709 + 79,955 (1+0.58)^{-1} + 87,650 (1+0.58)^{-2} + 96,058 (1+0.58)^{-3} + 105,244 (1+0.58)^{-4} + 115,280 (1+0.58)^{-5} + 126,242 (1+0.58)^{-6} + 138,214 (1+0.58)^{-7} + 151,289 (1+0.58)^{-8}$$

Por tanto el VPN tiene un valor positivo de:

$$\text{VPN} = +\$2,586$$

2. Seleccionando una tasa de interés del 59% el VPN resulta negativo como se muestra a continuación:

$$\text{VPN} = 153,709 + 79,955 (1+0.59)^{-1} + 87,650 (1+0.59)^{-2} + 96,058 (1+0.59)^{-3} + 105,244 (1+0.59)^{-4} + 115,280 (1+0.59)^{-5} + 126,242 (1+0.59)^{-6} + 138,214 (1+0.59)^{-7} + 151,289 (1+0.59)^{-8}$$

Por tanto el VPN tiene un valor negativo de:

$$\text{VPN} = -\$148$$

Ya teniendo los datos de VPN positivo y negativo se procede a interpolar de la siguiente manera:

Para interpolar se plantean las siguientes proporciones:

$$\begin{array}{r} 58 \dots\dots\dots 2,586 \\ X \dots\dots\dots 0.00 \\ 59 \dots\dots\dots -148 \end{array}$$

Utilizando los valores anteriores se realiza la interpolación de la siguiente manera.

$$((58-59)/(58-X)) = (2586-148) / (2586-0)$$

Despejando X queda:

$$\text{TIR}=58.95 \%$$

Por tanto la TIR a la cual el VPN=0 es TIR=58.95%

Con lo anterior se puede determinar que el proyecto es viable ya que la TIR tiene un valor mayor a la TIO que se había seleccionado anteriormente que era del 3%.

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

Debido a que esta tesis se divide en experimentación y estudios de factibilidad técnica, ambiental, política y económica se procederá a dar las conclusiones de manera particular.

Con respecto a la fase de experimentación se puede concluir que el proceso de digestión se lleva a cabo de manera correcta cuando la temperatura del sistema es constante, lo cual se logra colocando un aislante al digestor, en este caso tela de fibra sintética y plástico.

El hecho de que la temperatura se mantenga constante tiene como consecuencia inmediata una reducción en el TRH del digestor. Esto es debido a que las bacterias responsables de la metanización son muy sensibles a los cambios de temperatura y si se les mantiene a una temperatura constante se tropicalizan y llevan a cabo los procesos químicos de una forma correcta y ordenada en cuanto a secuencia de reacciones.

Con lo anterior se puede afirmar que si se mantiene la temperatura constante se propicia que el pH de la mezcla se comporte obedeciendo únicamente a los procesos químicos que ocurren dentro del digestor.

Con la experimentación se logró determinar que el sistema digestor debe mantenerse en un pH neutro de entre 6-8 para que el proceso de digestión se lleve a cabo satisfactoriamente y sin ser necesario el control de pH durante todo el proceso.

Se puede afirmar que en la fase en la que comienza la producción de metano el pH aumenta y se torna neutro lo cual es una señal que antecede a la producción de metano (CH_4), dicho fenómeno ocurrirá a lo largo de toda la fase de producción del mismo. Esto también se puede corroborar porque la inflamabilidad del biogás en esta fase de experimentación incrementa o disminuye de acuerdo al aumento o disminución de pH. Es decir a pH sin estabilización y con valor de 6 la inflamabilidad es casi nula o nula, a pH 6.5 la inflamabilidad es baja y a pH 7 la inflamabilidad es alta (se debe señalar que dichos valores de pH deben ser los valores del pH no estabilizado).

Con todo lo anterior se puede concluir que si la temperatura se mantiene constante y el pH entre los valores de 6-8, la producción de metano será satisfactoria y con un TRH razonable y posiblemente menor al teórico, como fue el caso de los experimentos en cuestión.

En cuanto a la producción de biogás, se puede decir que durante todo el TRH se estuvo produciendo biogás el cual se compone de CH_4 , CO_2 y otros gases. Los cuales se van produciendo de acuerdo a los procesos que se llevan a cabo dentro del digestor.

El dato experimental de producción de biogás es de 0.0173 m^3 biogás/ kg RUO, el TRH es de 30 días y el porcentaje de remoción de la mezcla es de 64% lo cual se traduce a que el 64% de la materia que se introduce en el digestor, es transformada a otros elementos.

Para finalizar las conclusiones de la parte experimental, se puede decir que el proceso de digestión de residuos orgánicos de CU presenta resultados satisfactorios a la experimentación y que de ser tratados con este proceso es posible evitar que los RUO de las cafeterías de CU sean dispuestos en tiraderos y sobre todo que emitan GEI de manera no controlada. Y en adición a estos beneficios los residuos o lodos digeridos productos de dicho proceso pueden ser utilizados como abono para la tierra o bien comida para algunos tipos de peces.

Abordando las conclusiones de factibilidad se puede concluir lo siguiente:

En cuanto a la factibilidad técnica se afirma que los cálculos arrojan resultados satisfactorios, ya que el tratamiento de los RUO del Cafesín produce el 280.7% de la energía que demanda anualmente su cocina. Así mismo dicha cafetería presenta espacio suficiente en los alrededores, para poder realizar la instalación de un sistema de digestión que produzca biogás que sustituya el gas LP que consume su cocina, dicho biogás puede producirse si aprovechan sus RUO en un sistema de digestión. Por lo anterior se concluye que dicha propuesta es factible técnicamente.

Tocando el tema de la factibilidad ambiental se observa que la propuesta es factible ambientalmente porque evita la emisión de 55.26 m^3 de CH_4 /año, lo cual se traduce a 0.03758 toneladas métricas de CH_4 /año o bien a 0.789 Toneladas métricas de CO_2 /año equivalente.

El tratamiento de los RUO del Cafesín tiene como consecuencia inmediata la contribución a la mitigación del efecto invernadero, así como la no contaminación de las áreas aledañas a la cafetería con lixiviados producto de los RUO. Y por si no fuera poco al desahogo de una parte del relleno sanitario de Huipulco. Así mismo contribuiría al mejoramiento de los suelos tratados con los lodos digeridos productos de la digestión.

Dentro de la factibilidad política se puede decir que el proyecto es factible políticamente debido a que hoy en día el gobierno apoya la realización de proyectos de energías renovables, así como el manejo de residuos sólidos orgánicos. Así mismo se puede decir que la parte regulatoria para estos temas aún no está bien definida y por tanto no hay reglas tan estrictas que se deban acatar y eso hace aún más sencillo el hecho de defender dichos sistemas ante las políticas nacionales, pero siempre tomando en cuenta la seguridad y el apego a las normas aplicables en las subactividades que la realización de dicho proyecto conlleve.

Para finalizar se puede afirmar que llevar a cabo dicho proyecto es factible económicamente a pesar de que el costo de inversión inicial es alto y los costos de operación y mantenimiento también. Dicha factibilidad se basa principalmente en el hecho de que el gas consumido por el Cafesín puede ser sustituido totalmente por el biogás producido por el sistema de digestión. Los datos que arrojan los cálculos son los siguientes y dejan expresada la factibilidad económica de la propuesta.

El VPN de dicho proyecto es +\$624,926, dicho VPN es positivo lo cual se traduce en que el proyecto es viable porque en pesos de hoy además de ganarse el 3% se obtiene una ganancia de \$624,926.

Realizando el cálculo de la TIR se arroja el siguiente resultado $TIR = 58.95\%$, la cual TIR resultante es mayor a la tasa de interés que el inversionista propone la cual es del 3% y por tanto significa que el proyecto es factible económicamente porque tiene una ganancia del 58.95%.

En general se puede concluir que la instalación de un sistema de digestión en el Cafesín es viable y por tanto se puede tomar la decisión de que el proyecto ¡Sí va! .

ANEXO 1

COORDINACION DE AREAS VERDES Y FORESTACION
PLANTA DE COMPOSTA
COMPARATIVA DE MATERIAL COLECTADO Y RECIBIDO EN JORNADA LABORAL NORMAL Y EN TIEMPO EXTRA m3

SEMANA	2006			2007			2008		
	NORMAL	EXTRA	COMPOSTA	NORMAL	EXTRA	COMPOSTA	NORMAL	EXTRA	COMPOSTA
1				0	72	0	0	0	0
2				380	52	64	0	0	0
3		120	6	288	216	0	0	0	0
4	200	76	40	312	224	72	328	112	24
5	0	12	32	260	308	32	268	104	0
6	112	180	16	248	224	16	160	172	140
7	176	128	60	196	244	120			
8	160	144	40	124	136	120	212	208	24
9	164	144	40	224	272	192	172	192	84
10	68	180	48	132	172	328	22	12	100
11	184	176	16	160	184	168			
12	128	36	24	178	136	124			
13	168	164	0	130	248	40	21	18	
14	156	160	0	0	363	8	318	112	
15	0	284	12	200	224	8	140		
16	244	136	4	194	264	176	228	104	12
17	120	76	16	128	224	184	208	64	80
18	148	112	40	132	156	216	14	100	10
19	72	112	0	124	284	138	184	104	10
20	112	156	24	136	188	56	184	104	24
21	204	188	24	136	144	80	204	184	
22	144	212	160	132	136	80	168	84	40
23	216	148	64	200	220	48	372	16	8
24	296	148	120	248	160	112	200	204	40
25	156	116	88	188	88	56	36	8	12
26	192	68	24	192	0	32	168	124	24
27	0	0	0	176	0	0	124	8	8
28	540	0	0	0	248	0	0	8	8
29	476	240	6	0	220	0	0	504	8
30	344	256	8	0	0	0	0	456	8
31	200	120	16	208	16	32	208	80	8
32	140	296	0	260	40	8	264	176	8
33	192	252	0	276	76	16	300	184	8
34	156	184	32	180	52	0	152	22	8
35	200	212	16	172	56	0	276	204	48
36	208	300	260	272	40	72	300	272	120
37	118	168	30	0	0	0	244	164	8
38	204	216	69	144	64	0	140	76	24

39	296	454	420	148	140	72	216	200	40
40	160	260	0	108	168	2	324	224	64
41	172	92	152	208	237	0	316	192	8
42	168	168	0	276	140	48	404	232	32
43	224	138	56	224	168	8	304	220	40
44	56	20	128	88	8	0	228	156	48
45	200	144	40	204	212	136	264	56	4
46	228	96	144	156	128	24	316	296	24
47	84	132	48	136	116	8	252	320	200
48	184	152	0	0	125	0	228	252	56
49	128	80	200	0	0	0	220	120	12
50	0	260	112	0	0	0	40	0	0
51	0	240	0	0	268	0	0	676	112
52	0	216	0	0	252	0	0	352	16
53				0	96	0	0	400	0
	8096	7952	2635	7876	7809	2894	9713	10154	1731
	N	TX	C						
2006	8096	7952	2635						
2007	7876	7809	2894						
2008	9713	10154	1731						

TOTAL m3 N+TX

2006	16084	2635
2007	15685	2894
2008	19867	1731

ANEXO 2

<i>Universidad Nacional Autónoma de México</i>				
Autorizaciones o Permisos				
Otorgados al 30 de septiembre de 2008				
<i>Descripción</i>	<i>Autorizado</i>	<i>Plazo</i>		<i>Referencia</i>
		<i>Inicia</i>	<i>Concluye</i>	
CAFETERIAS				
CIRCUITO EXTERIOR	RUIZ FLORES RAUL	01/01/2008	31/12/2008	1
FACULTAD DE MEDICINA	COSSIO VILLARREAL GREGORIO	01/01/2008	31/12/2008	2
FACULTAD DE QUIMICA	CRESPO PEREZ ROBERTO	01/01/2008	31/12/2008	3
FACULTAD DE ARQUITECTURA	GRAJALES ROMO ARMANDO	01/01/2008	31/12/2008	5
FACULTAD DE ARQUITECTURA	GRAJALES ROMO ARMANDO	01/01/2008	31/12/2008	6
FACULTAD DE ODONTOLOGIA	GRAJALES ROMO ARMANDO	01/01/2008	31/12/2008	7
FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS	LUJANO TORRES SERGIO	01/01/2008	31/12/2008	8
FACULTAD DE ODONTOLOGIA	PENA GASCA RAUL	01/01/2008	31/12/2008	9
COORDINACION DE DIFUSION CULTURAL	MUNOZ ZURITA RICARDO	01/01/2008	31/12/2008	10
DIRECCION GENERAL DE DIVULGACION DE LA CIENCIA	PENA GASCA RAUL	01/01/2008	31/12/2008	11
FACULTAD DE ECONOMIA	CRESPO PEREZ ROBERTO	01/01/2008	31/12/2008	13
COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES PLANTEL SUR	HERNANDEZ ORTEGA CARLOS	01/01/2008	31/12/2008	15
C.E.N.A.P.R.E.D.	ELENA GUADALUPE HERNANDEZ CARRION	01/01/2008	31/12/2008	16
FACULTAD DE INGENIERIA	QUINTANAR FLORIANO EDUARDO	01/01/2008	31/12/2008	18
DIRECCION GENERAL DE RADIO UNAM	GRAJALES ROMO ARMANDO	01/01/2008	31/12/2008	19
FACULTAD DE CIENCIAS POLITICAS Y SOCIALES	GRUPO CULINARIO ALLENDE, S.A. DE C.V.	01/01/2008	31/12/2008	20
INSTITUTO DE INGENIERIA	MUNOZ ZURITA RICARDO	01/01/2008	31/12/2008	21
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA	YUNUEN ALONSO MARTINEZ	01/01/2008	31/08/2008	22
COORDINACION DE SERVICIOS ADMINISTRATIVOS, CAMPUS UNAM JURIQUILLA	BUENDIA MAGALLON GEORGINA	01/01/2008	31/12/2008	23
BARRAS				
FACULTAD DE ODONTOLOGIA	SARACHO ROSALES ALEJANDRO Y/O YOLANDA GONZÁLEZ CAMPOS	01/01/2008	31/12/2008	2
FACULTAD DE DERECHO	ANGELES DELGADILLO ANTONIO	01/01/2008	31/12/2008	3
FACULTAD DE QUIMICA	BALTAZAR SEGURA ISABEL	01/01/2008	31/12/2008	4
FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN	BELINDA SANTAMARIA MARIA DEL CARMEN	01/01/2008	31/12/2008	5
DIRECCION GENERAL DE INCORPORACION Y REVALIDACION DE ESTUDIOS (D.G.I.R.E.)	CASAS SANCHEZ MARIA JOVITA	01/01/2008	31/12/2008	7
FACULTAD DE DERECHO	CASTANEDA RAMIREZ MARIA CONCEPCION	01/01/2008	31/12/2008	8
FACULTAD DE DERECHO	CRUZ MECINAS JULIAN	01/01/2008	31/12/2008	12
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA	CRUZ MENDOZA ALEJANDRO	01/01/2008	31/12/2008	13
FACULTAD DE INGENIERIA	CHAVEZ VARELA MARCELA	01/01/2008	31/12/2008	14
FACULTAD DE MEDICINA	FLORES CHAVEZ LUZ MARIA	01/01/2008	31/12/2008	16
FACULTAD DE MEDICINA	IBARRA FLORES SALVADOR	01/01/2008	31/12/2008	17
FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN	MAQUEDA GARCIA JOSEFINA	01/01/2008	31/12/2008	19
DIRECCION GENERAL DE ORIENTACION VOCACIONAL Y SERVICIOS EDUCATIVOS	GARDUNO GARDUNO ELENA	01/01/2008	31/12/2008	20
FACULTAD DE DERECHO	GARDUNO URBINA JOSE MODESTO	01/01/2008	31/12/2008	21
FACULTAD DE ARQUITECTURA	IBANEZ SANTOS JOSE JACINTO	01/01/2008	31/12/2008	22

**Autorizaciones o Permisos
Otorgados al 30 de septiembre de 2008**

Descripción	Autorizado	Plazo		Referencia
		Inicia	Concluye	
FACULTAD DE DERECHO	SILVA IBARRA ROGELIO	01/01/2008	31/12/2008	23
FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN	JURADO FIGUEROA MARIA DE JESUS	01/01/2008	31/12/2008	24
FACULTAD DE MEDICINA	LANDEROS LUNA ALBERTA Y/O MARIA DOLORES MELÉNDEZ LANDEROS	01/01/2008	31/12/2008	25
FACULTAD DE MEDICINA	LINARES CHAVEZ ALICIA	01/01/2008	31/12/2008	26
FACULTAD DE DERECHO	VALDEZ MALDONADO MARIA DOLORES	01/01/2008	31/12/2008	27
FACULTAD DE DERECHO	MAYA VALENCIA ANGELINA	01/01/2008	31/12/2008	28
FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS	MENA GARCIA CAROLINA	01/01/2008	31/12/2008	29
FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS	MENA GARCIA CAROLINA	01/01/2008	31/12/2008	30
FACULTAD DE MEDICINA	MUNOZ MUNGUIA JOSE JUAN	01/01/2008	31/12/2008	32
DIRECCION GENERAL DE ORIENTACION VOCACIONAL Y SERVICIOS EDUCATIVOS	ORTIZ MIRANDA SARA	01/01/2008	31/12/2008	33
FACULTAD DE INGENIERIA	ORTIZ MIRANDA SARA	01/01/2008	31/12/2008	34
FACULTAD DE MEDICINA	PAVON JORGE JESUS	01/01/2008	31/12/2008	35
FACULTAD DE DERECHO	RAMIREZ HERNANDEZ SOCORRO	01/01/2008	31/12/2008	39
FACULTAD DE ARQUITECTURA	RAMIREZ RANGEL GLORIA	01/01/2008	31/12/2008	40
FACULTAD DE QUIMICA	RODRIGUEZ ISABEL BENJAMIN	01/01/2008	31/12/2008	41
FACULTAD DE MEDICINA	RUIZ SOTO SALVADOR	01/01/2008	31/12/2008	43
FACULTAD DE DERECHO	SALGADO BASTIDA BELEM Y/O MARIA DE LOURDES SILVA SALGADO	01/01/2008	31/12/2008	44
FACULTAD DE QUIMICA	VARGAS MONTESA DE OCA GUADALUPE	01/01/2008	31/12/2008	45
FACULTAD DE INGENIERIA	TORRES ARELLANO HECTOR HUGO	01/01/2008	31/12/2008	46
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMÉDICAS	VILLEDA PLAZA JORGE LUIS	01/01/2008	31/12/2008	47
DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	OLIVARES ROMERO REBECA	01/01/2008	31/12/2008	48
ESCUELA NACIONAL PREPARATORIA PLANTEL 5 "JOSÉ VASCONCELOS"	LEE PEREZ HECTOR	01/01/2008	31/12/2008	50
INSTITUTO DE FISICA	LUJANO TORRES SERGIO	01/01/2008	31/12/2008	51
INSTITUTO DE GEOLOGIA	MORETT CUBAS PAMELA Y/O LAURA GUADALUPE LABRADA BOJORQUEZ	01/01/2008	31/12/2008	53
FACULTAD DE QUIMICA	SEGURA CASTANEDA ESTEFANIA	01/01/2008	31/12/2008	56
ESCUELA NACIONAL DE ENFERMERIA Y OBSTETRICIA	SOTO DURAN LUCIA	01/01/2008	31/12/2008	57
DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS GENERALES	TORRES VITE FLAVIA	01/01/2008	31/12/2008	58
FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN	SOTELO BLANCO REYNA	01/01/2008	31/12/2008	59
	MENDOZA MONTES DE OCA SERGIO	01/01/2008	31/12/2008	60
CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA	RADILLA ALANIS CESAR	01/01/2008	31/12/2008	66
FACULTAD DE CIENCIAS	VICTORIA SANTIAGO JOSE	01/01/2008	31/12/2008	67
COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES PLANTEL ORIENTE	EDGAR VICENTE HUERTA HERNANDEZ Y/O DAVID MEDINA RUIZ	01/01/2008	31/12/2008	68

**Autorizaciones o Permisos
Otorgados al 30 de septiembre de 2008**

Descripción	Autorizado	Plazo		Referencia
		Inicia	Concluye	
COORDINACION DE DIFUSION CULTURAL	VELAZQUEZ SANCHEZ ROBERTO ALEJANDRO	01/01/2008	31/12/2008	69
COORDINACION DE DIFUSION CULTURAL	VELAZQUEZ SANCHEZ ROBERTO ALEJANDRO	01/01/2008	31/12/2008	70
DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	SILVA SILVERIO PAULINA	01/01/2008	31/12/2008	76
DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	GONZALEZ AMAYA LORENZO	01/01/2008	31/12/2008	78
DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS GENERALES	ARCE MARTINEZ JUAN	01/01/2008	31/12/2008	79
ESCUELA NACIONAL PREPARATORIA PLANTEL 3 "JUSTO SIERRA"	RODRIGUEZ MAURICE ROSARIO DE LOURDES	01/01/2008	31/12/2008	81
DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	MARTINEZ HERNANDEZ ANTONIO	01/01/2008	31/12/2008	82
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ANTROPOLÓGICAS	PEREZ MAXIMO JOSE MAXIMO	01/01/2008	31/12/2008	84
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA	MUJICA NAVA SILVIA	01/01/2008	31/12/2008	85
FACULTAD DE CIENCIAS POLITICAS Y SOCIALES	SARABIA HERRERA JUVENTINO IRINEO	01/01/2008	31/12/2008	86
FACULTAD DE DERECHO	LOMELI ORIGEL JOSE EMMANUEL	01/03/2008	31/12/2008	87
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA	HERNANDEZ REAL MIGUEL	01/01/2008	31/12/2008	88
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA	CASTANON CERVANTES ROCIO	01/01/2008	31/12/2008	89
DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	TORRES MARTINEZ ESPERANZA	01/01/2008	31/12/2008	90
DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	SARABIA HERRERA JUVENTINO IRINEO	01/01/2008	31/12/2008	91
DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	ROJAS AGUILAR MANUEL Y/O VICTOR ROJAS NOYOLA	01/01/2008	31/12/2008	92
DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	CRUZ URBINA CRISTINA	01/01/2008	31/12/2008	93
DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	LANDEROS VEGA AURELIANO	01/01/2008	31/12/2008	94
DIRECCION GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	ANDRADE VILLA VERONICA	01/01/2008	31/12/2008	95
FACULTAD DE CONTADURIA Y ADMINISTRACIÓN	MAQUEDA LUCAS CARMEN	01/01/2008	31/12/2008	97
ESCUELA NACIONAL DE TRABAJO SOCIAL (CAMELLÓN, PARADA MB)	GUADARRAMA LOPEZ IGNACIO	01/03/2008	31/12/2008	98
ESCUELA NACIONAL DE TRABAJO SOCIAL (CAMELLÓN, PARADA MB)	MUNOZ GAMBOA ARTURO	01/04/2008	31/12/2008	99
ESCUELA NACIONAL DE TRABAJO SOCIAL (CAMELLÓN, PARADA MB)	SARABIA HERRERA JUVENTINO IRINEO	01/04/2008	31/12/2008	100

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baca G. 2005. Ingeniería Económica. Editorial: Fondo Educativo Panamericano. Octava edición. Bogota D. C, Colombia.

Bailie, R. 1979. Technical and Economic Assesment of Methods for Direct Conversion of Agricultural Residue to Usable Energy; Final Report. Publicación de: West Virginia University. Morgantown, West Virginia. Preparado para: Energy Research and Development Administration. Washington D.C., EUA.

Braunstein, H. et al. 1981. Biomass Energy Systems and the Environment. Editorial: Pergamon Press. New York, EUA.

Castells, X. 2005. Tratamiento y Valorización Energética de Residuos. Primera edición. Fundación Universitaria Iberoamericana: Díaz de Santos. Barcelona, España.

Castro-González. 2009. Diseño e Instalación de Sistemas de Bioenergía. Apuntes de la materia para la carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica del módulo de Sistemas Energéticos. Facultad de Ingeniería UNAM. Ciudad Universitaria México, Distrito Federal, México.

Cecchi, F., Traverso, P., Mata-Alvarez, Clancy, J. y Zaror, C. 1988. State of the Art of Research and Development in the Anaerobic Digestion Process of Municipal Solid Waste in Europe. *Biomass*. 16 (4).

Chandler, A., Jewell, J., Gossett, M., Vansoset, J. y Robertson, B. 1980. Predicting Methane Fermentation Biodegradability. En memorias de Biotechnology and Bioengineering Symposium. No. 10 pp. 93-107.

Chilton Company. 1962. Handbook Butane-Propane Gases, pág. 22. 4th eition. Publ. Chilton Company. Los Ángeles, EEUUA.

Chynoweth, D., Earl, F., Bosch, G. y Lagrand, R. 1990. Biogasification of Processed MSW. *BioCycle*. 31(10).

Comisión Nacional de Energía (CNE) y la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. 2007. Guía para Evaluación Ambiental Energías Renovables No Convencionales, Proyectos de Biomasa. Santiago de Chile, Chile.

Concheiro, A. y Rodríguez, L. 1985. Alternativas Energéticas. Editorial Fondo de Cultura Económica. México, D.F., México.

Creus, S. 2004. Energías Renovables. CEISA. Barcelona, España.

Deublein D. y Steinhauser A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction. Editorial Wiley-VCH. Republica Federal de Alemania, Alemania.

Drobny, N., Hull, H. y Testiu, R. 1971. Recovering and Utilization of Municipal Solid Waste. Publicación de: U.S. Environmental Protection Agency. Numero: SW-10c. Washington D.C., EEUUA.

EPA a, Environmental Protection Agency. 2010. Coalbed Methane Outreach Program (CMOP). Interactive Units Converter. USA

<http://www.epa.gov/cmop/resources/converter.html>

EPA b, Environmental Protection Agency. 2010. Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. USA.

<http://www.epa.gov/RDEE/energy-resources/calculator.html>

Fernández, J. 2008 a. Energías Renovables para todos, Biomasa. Colección elaborada por Haya Comunicación, editora de la revista “Energías Renovables”, con el patrocinio de IBERDROLA. Madrid, España.

Fernández, J. 2008 b. Energías Renovables para todos, Biocarburantes. Colección elaborada por Haya Comunicación, editora de la revista “Energías Renovables”, con el patrocinio de IBERDROLA. Madrid, España.

GTZ. 2003. Sector Project Mechanical-biological Waste Treatment, Final Report. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Eschborn, Alemania.

Guevara, A. 1996. Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Anaerobios Rurales, Producción de gas y Saneamiento de Efluentes. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Peru.

Jarabo F. y Elortegui N. 2000. Energías Renovables. Segunda edición. Editorial Era Solar. Madrid, España.

Jewell, W. 1979. Future Trend in Digester Design. En D.A. Stafford. B. I. Wheatly y D.E. Hughes (eds.): Proceedings of First International Symposium on Anaerobic Digestion, pp.17-21, Cardiff, Wales, Applied Science Publishers Ltd. Londres, Inglaterra.

Kaiser, E. 1966. Chemical Analyses of Refuse Compounds. En Proceedings of National Incinerator Conference. ASME, Nueva York, EEUUA.

Mandujano, Maria I.1981. Biogás, Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos, manual para el promotor de tecnología. OLADE, IIE. Cuernavaca, Morelos, México.

Neissen, W. 1977. Properties of Waste Materials, en D. G. Wilson(ed.): Handbook of solid Waste Management, Van Nostrand Reinhold. Nueva York, EEUUA.

OECD/IEA. 2004. Renewable Energy (Market & Policy Trends in IEA Countries). Publicación de: Organization for Economic Co-operation and Development and International Energy Agency. París, Francia.

OECD, 2004. Biomass and Agriculture: Sustainability, Markets and Policies. Publicación de: Organization for Economic Co-operation and Development. París, Francia.

SENER, 2010. Metodología, tablas y precios. Publicación de la Subsecretaria de hidrocarburos (Dirección de gas LP). Secretaria de Energía. México, D.F., México.

Singer J. 1981. Combustion Fossil Power Systems, Combustion Engineering. Editorial: Inc. Windsor. C.T.

SINE, 2009. Sistema Nacional de Emisiones. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente SEMARNAT. México, D.F., México.

Steadman, P. 1978. Energía Medio Ambiente Y Edificación. Primera edición. Editorial H. Blume Ediciones. Traducción al español. Madrid, España.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil S. 1994 a. Gestión Integral de Residuos Sólidos, volumen I. Primera edición. Editorial Mc Graw Hill/ Interamericana de España, S.A. Traducción al español. Madrid, España.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil S. 1994 b. Gestión Integral de Residuos Sólidos, volumen II. Primera edición. Editorial Mc Graw Hill/ Interamericana de España, S.A. Traducción al español. Madrid, España.

Wujcik, J. y Jewell, W. 1980. Dry Anaerobic Fermentation. En memorias de Biotechnology and Bioengineering Symposium. num.10. Editorial: Wiley. Nueva York, EUA.