

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
RESUMEN	VIII
GLOSARIO	IX
INTRODUCCIÓN	XI
OBJETIVO	XII
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	1
1.1 ¿Qué son los residuos?	1
1.1.1 Residuos sólidos urbanos.....	7
1.1.2 Residuos sólidos orgánicos domiciliarios.....	8
1.2 Desarrollo de la gestión de residuos sólidos.....	8
1.3 Elementos funcionales de un sistema de gestión de residuos.....	9
1.3.1 Generación de residuos.....	10
1.3.2 Manipulación de residuos y separación, almacenamiento y procesamiento en el origen .	10
1.3.3 Recolección	11
1.3.4 Separación, procesamiento y transformación de residuos sólidos	13
1.3.5 Transferencia y transporte	13
1.3.6 Evacuación.....	14
1.4 Cambios futuros en los componentes de residuos	14
1.4.1 Residuos de comida	14
1.4.2 Papel y cartón	14
1.4.3 Residuos de jardín	14
1.4.4 Plásticos	15
1.5 Situación actual en México.....	15
1.6 Relleno sanitario	17
1.6.1 Definición	17
1.6.2 Antecedentes.....	17
1.6.3 El relleno sanitario en los sistemas de manejo de residuos sólidos municipales	18
1.6.4 Ventajas y desventajas del relleno sanitario	19
1.6.5 Metodología de selección del sitio	20
1.6.6 Identificación y evaluación de zonas de estudio	20
1.6.7 Rellenos sanitarios en México	21

1.6.7.1 Bordo Poniente	22
1.6.7.2 El futuro de Bordo Poniente	23
1.6.7.3 Parque Fresh Kills en Nueva York	23
1.6.8 Gas de vertedero	24
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS	26
2.1 Biomasa	26
2.1.1 Aplicaciones generales de la biomasa	26
2.1.2 Clasificación de la biomasa	27
2.1.3 Transformaciones energéticas de la biomasa	29
2.1.4 Biomasa como fuente de energía	30
2.1.4.1 Residuos de madera	30
2.1.4.2 Residuos de la industria agrícola y ganadera	31
2.1.4.3 Residuos ganaderos	31
2.1.5 La calidad de la biomasa como combustible	32
2.1.6 Consumo de la biomasa	32
2.1.7 Aspectos ambientales del consumo de biomasa	34
2.1.7.1 Materiales leñosos	34
2.1.7.2 Residuos biodegradables	35
2.1.7.3 Cultivos energéticos	35
2.1.7.4 Biocarburantes	35
2.1.8 Biomasa a nivel mundial	35
2.1.9 Potencial para 2010 de la Unión Europea	36
2.1.10 Potencial eléctrico regional de fuentes de biomasa en México	37
2.2 Combustibles renovables gaseosos	39
2.2.1 Biogás	39
2.3 La digestión	41
2.3.1 Beneficios de la digestión	42
2.3.2 Fases de la fermentación	42
2.3.2.1 Factores biológicos y biodegradabilidad	44
2.3.2.2 Métodos de estimación de biodegradabilidad	45
2.3.3 Producción de biogás	47
2.3.4 Parámetros ambientales y operacionales del proceso	47
2.3.5 Potencial de hidrógeno	47

2.3.5.1 Potencial redox	48
2.3.5.2 Nutrientes.....	48
2.3.5.3 Temperatura.....	48
2.3.5.4 Toxicidad e inhibición	49
2.3.5.5 Agitación ó mezclado	50
2.3.5.6 Otros parámetros.....	50
2.3.6 Producción de abono orgánico	50
2.3.7 La digestión y el control de la contaminación.....	51
2.3.8 Producción de biogás en la Unión Europea.....	51
2.4 Criterios para considerar en el diseño de un reactor anaerobio	54
2.5 Tipos de reactores anaerobios.....	55
2.5.1 Fosas sépticas	55
2.5.2 Reactor anaerobio de domo flotante (indio).....	57
2.5.3 Reactor anaerobio de domo fijo (chino).....	58
2.5.4 Reactor anaerobio de estructura flexible	58
2.5.5 Reactores anaerobios de alta velocidad o flujo inducido	59
2.5.6 Los reactores anaerobios de segunda y tercera generación	61
2.5.7 Instalaciones Industriales.....	61
2.5.8 Reactores anaerobios en el mundo	62
2.6 Substrato a digerir.....	63
2.7 Dimensionamiento.....	63
2.7.1 Dimensionamiento del reactor.....	64
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	66
3.1 Caso de estudio.....	66
3.2 Reactor anaerobio	67
3.3 Operación del reactor anaerobio.....	69
3.3.1 Agitación	69
3.3.2 Temperatura.....	69
3.3.3 Medición de pH	69
3.3.4 Medición de biogás.....	69
3.3.5 Carga del reactor anaerobio.....	70
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
4.1 Arranque del reactor anaerobio	71
4.2 Medición del pH	72

4.3 Temperatura.....	73
4.4 Producción diaria de biogás.....	74
4.4.1 Producción total de biogás.....	77
4.4.2 Rendimiento de la flama.....	78
4.5 TRH.....	79
4.6 Producción diaria específica de biogás.....	79
4.7 Cálculos para posible escalamiento del reactor anaerobio.....	80
4.7.1 Substrato.....	80
4.7.2 Volumen del reactor anaerobio.....	81
4.7.3 Estimación de la producción diaria de biogás (PDB).....	82
4.7.4 Carga orgánica másica y sólidos totales.....	82
4.8 Costo del reactor anaerobio.....	83
4.9 Desarrollo del modelo de evaluación económica.....	84
4.9.1 Resultados del modelo de evaluación económica.....	86
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....	89
REFERENCIAS.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Composición de la basura en el DF.....	XI
Figura 1.1	Líneas de consumo y producción de residuos.....	1
Figura 1.2	Composición de la basura en Nueva Zelanda 2004.....	2
Figura 1.3	Gasto por país en el tratamiento de la basura a nivel mundial, gasto en USD por persona anual.....	3
Figura 1.4	Población total por delegaciones en el D.F. 2008.....	3
Figura 1.5	Generación total de residuos (ton/día) por delegación 2008.....	4
Figura 1.6	Vehículos utilizados por delegación para la recolección de residuos 2008	4
Figura 1.7	Consumo y reciclaje de desechos en Nueva Zelanda 2000-2007.....	5
Figura 1.8	Generación de basura en México en el año 2006.....	6
Figura 1.9	Generación anual de residuos per cápita a nivel mundial.....	6
Figura 1.10	Flujo de materiales y la generación de residuos sólidos en una sociedad tecnológica.....	7
Figura 1.11	Residuos sólidos urbanos.....	8
Figura 1.12	Residuos sólidos orgánicos domiciliarios.....	8
Figura 1.13	Elementos funcionales que constituyen un sistema de gestión de residuos sólidos.....	9
Figura 1.14	Generación de residuos.....	10
Figura 1.15	Manipulación de residuos y separación, almacenamiento y procesamiento en el origen.....	11
Figura 1.16	Recolección.....	11
Figura 1.17	Separación de residuos sólidos.....	13
Figura 1.18	Gasto final privado, producto interno bruto PIB y generación de RSU, 1997-2007.....	16
Figura 1.19	Generación per cápita de RSU (kg/hab/año).....	16
Figura 1.20	Diagrama de un Sistema de Relleno Sanitario.....	18
Figura 1.21	Relleno Sanitario Bordo Poniente.....	22
Figura 1.22	Parque Fresh Kills en Nueva York.....	24
Figura 1.23	Captación y uso del gas de veredero.....	25
Figura 2.1	Esquema sintético del origen de la biomasa.....	26
Figura 2.2	Aplicaciones generales de la biomasa.....	27
Figura 2.3	Recursos de biomasa potenciales y reales.....	28
Figura 2.4	Transformaciones energéticas de la biomasa.....	29
Figura 2.5	Procesos generales de generación y aprovechamiento de la biomasa.....	30
Figura 2.6	Esquema de principio de la co-digestión.....	32
Figura 2.7	Consumo de biomasa por sectores, España 1994.....	33
Figura 2.8	Impacto ambiental comparado.....	34
Figura 2.9	Potencial eléctrico de residuos forestales, pecuarios y RSU.....	38
Figura 2.10	Fases de la fermentación anaeróbica.....	44
Figura 2.11	Características típicas de un substrato orgánico.....	45
Figura 2.12	Síntesis del efecto de los parámetros físico químicos sobre la producción de biogás.....	47
Figura 2.13	Etapas de crecimiento bacterias.....	49
Figura 2.14	Potencial de metano entre el año 2007 y 2020 UE.....	54

Figura 2.15	Ubicación de la fosa séptica en la instalación.....	56
Figura 2.16	Trampa de grasas.....	56
Figura 2.17	Fosa séptica.....	57
Figura 2.18	Reactor anaerobio de domo flotante, indio.....	57
Figura 2.19	Reactor anaerobio de domo fijo, chino.....	58
Figura 2.20	Reactor anaerobio de polietileno.....	59
Figura 2.21	Esquema reactor anaerobio tercera generación.....	61
Figura 2.22	Reactor anaerobio industrial.....	62
Figura 3.1	Diseño del reactor anaerobio	67
Figura 3.2	Primer prototipo armado.....	68
Figura 3.3	Modelo final del reactor anaerobio.....	68
Figura 3.4	Medición del biogás acumulado, por el método de desplazamiento de agua.....	69
Figura 4.1	Alimentación del reactor anaerobio.....	69
Figura 4.2	Substratos disponibles, régimen continuo.....	72
Figura 4.3	Substratos disponibles, régimen discontinuo.....	72
Figura 4.4	Comportamiento del pH, régimen continuo	73
Figura 4.5	Comportamiento del pH, régimen discontinuo.....	73
Figura 4.6	Comportamiento de temperatura en el reactor, régimen continuo.....	74
Figura 4.7	Comportamiento de temperatura en el reactor, régimen discontinuo.....	74
Figura 4.8	Producción de biogás, régimen continuo	75
Figura 4.9	Producción de biogás, régimen discontinuo.....	75
Figura 4.10	Medición de presión a la salida.....	76
Figura 4.11	Flama autosustentable.....	76
Figura 4.12	Generación total biogás, carga diaria.....	77
Figura 4.13	Generación total biogás, carga discontinua.....	77
Figura 4.14	Producción diaria específica de biogás, carga diaria.....	80
Figura 4.15	Producción diaria de biogás, carga discontinua.....	80
Figura 4.16	Flujo de efectivo en Excel	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Generación anual de residuos y número de vehículos recolectores en la ciudad de Monterrey.....	12
Tabla 1.2	Generación anual de residuos y número de vehículos recolectores en el Distrito Federal.....	12
Tabla 1.3	Generación per cápita diaria, (Kg/hab*día).....	17
Tabla 1.4	Rellenos sanitarios en el año 2006 por entidad federativa.....	21
Tabla 2.1	Consumo de biomasa por sectores de actividad, España 1994.....	33
Tabla 2.2	Potencial de biomasa en la Unión Europea en el 2010.....	36
Tabla 2.3	Potencial eléctrico por fuente de biomasa.....	38
Tabla 2.4	Composición típica del biogás.....	40
Tabla 2.5	Características del biogás.....	40
Tabla 2.6	Usos equivalentes del biogás.....	40
Tabla 2.7	Correspondencia de 1m ³ de biogás con otros combustibles.....	41
Tabla 2.8	Estimación de SVB contenidos en varios substratos con base a reactores de una carga en larga duración.....	46
Tabla 2.9	Contenido de lignina de algunos substratos orgánicos.....	46
Tabla 2.10	Ventajas y desventajas de reactores termofílicos y mesofílicos.....	49
Tabla 2.11	Producción primaria de biogás en la Unión Europea 27 en 2006 y 2007...	52
Tabla 2.12	Potencial de biogás en el año 2020 en la Unión Europea.....	53
Tabla 2.13	Cantidad y composición anual de excremento producido por diversos animales de granja.....	63
Tabla 2.14	Composición de lo RSU en el D.F.....	64
Tabla 2.15	Demanda energética de los usuarios.....	65
Tabla 3.1	Desechos orgánicos utilizados para la alimentación del reactor anaerobio	66
Tabla 3.2	Días de carga para la alimentación de forma discontinua del reactor anaerobio.....	70
Tabla 3.3	Condiciones iniciales del reactor anaerobio.....	70
Tabla 4.1	Rendimiento flama, carga diaria.....	78
Tabla 4.2	Rendimiento flama, carga discontinua.....	78
Tabla 4.3	Demanda energética de los usuarios.....	79
Tabla 4.4	Comparación de resultados promedio para diversas cargas de operación de reactores anaerobios.....	81
Tabla 4.5	Carga másica y sólidos totales para cargas discontinuas.....	83
Tabla 4.6	Comparación del % ST con otros autores.....	83
Tabla 4.7	Costo total del reactor anaerobio.....	84
Tabla 4.8	Flujo de efectivo para el prototipo	85