

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE TABLAS	I
LISTA DE FIGURAS	II
NOMENCLATURA	III

RESUMEN	IV
---------	----

Página

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVO GENERAL	2
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES Y ANÁLISIS TÉCNICO

2.1 Digestión de lodos biológicos	3
2.2 Proceso de tratamiento de las aguas residuales de Ciudad Universitaria	4
2.2.1 Sistema de lodos activados	5
2.2.2 Filtros percoladores	7
2.2.3 Discos biológicos	9
2.3 Degradación anaerobia	10
2.4 Condiciones del proceso de la degradación anaerobia	12
2.4.1 pH, alcalinidad y la relación ácidos volátiles/alcalinidad	12
2.4.2 Temperatura	13
2.4.3 Tiempo de retención de sólidos e hidráulico	13
2.5 Factores de Inhibición	14
2.5.1 Amoníaco	14
2.5.2 Sulfuro	15
2.5.3 Competencia	15
2.5.4 Toxicidad	16
2.5.5 Sodio	16
2.5.6 Potasio	17
2.5.7 Metales pesados	18
2.5.8 Hidrógeno	18
2.5.9 Ácidos grasos volátiles (AGV)	19
2.5.10 Ácidos grasos de larga cadena (AGLC)	20
2.6 Pretratamiento	21
2.6.1 Pretratamiento térmico	21
2.6.2 Pretratamiento mecánico	22
2.6.3 Pretratamiento químico	22
2.6.3.1 Hidrólisis ácida y alcalina	23
2.6.3.2 Pretratamiento oxidativo del lodo	24
2.6.4 Ultrasonido	24

CAPÍTULO 3

BIOMASA PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA

3.1	Energía de la biomasa	26
3.2	Conversión de la biomasa en energía	26
3.2.1	Procesos termoquímicos	27
3.2.2	Procesos fisicoquímicos	27
3.2.3	Procesos bioquímicos	29
3.3	Tipos de reactores anaerobios	31
3.3.1	Digestión de velocidad estándar a condiciones ambientales	31
3.3.2	Digestor de alta velocidad con regulación de temperatura	32
3.3.3	Digestor de dos etapas	32
3.3.4	Digestión mesofílica y termofílica	33
3.4	Criterios de diseño para digestores de una sola etapa y de alta velocidad	33
3.4.1	Base de la población	33
3.4.2	Carga volumétrica de los sólidos	34
3.4.3	Tiempo de retención de sólidos (TRS)	34
3.4.4	Reducción de sólidos volátiles	35
3.4.5	Diseño del reactor	35
3.4.6	Mezcla del digestor	36
3.4.7	Bombeo de recirculación externa	36
3.4.8	Mezcla mecánica interna	37
3.4.9	Mezcla interna del gas	37
3.4.10	Control de temperatura	37
3.4.11	Requisitos de calentamiento	38
3.4.12	Equipo de calefacción	38
3.4.13	Cubiertas del digestor	39
3.5	Predicción de la producción de biogás	39

CAPÍTULO 4

BIOGÁS

4.1	Composición del biogás	41
4.2	Limpieza del biogás	42
4.2.1	Remoción del dióxido de carbono	42
4.2.2	Remoción del agua	45
4.2.3	Remoción de H ₂ S	45
4.2.4	Remoción de trazas de gases	45
4.3	Compresión y almacenamiento del biogás	47
4.4	Calor y electricidad	48
4.5	Unidades CHP	49

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DE CASO DE ESTUDIO

5.1	Cuantificación de los lodos biológicos de exceso de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria	51
5.2	Producción de biogás y metano	52
5.3	Producción de electricidad	52
5.4	Volumen del digestor y del tanque de lodo digerido	53

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1	Factibilidad técnica	54
6.1.1	Reactor anaerobio	54
6.1.2	Generador eléctrico	57
6.2	Factibilidad Ambiental	59
6.3	Factibilidad Económica	62
6.3.1	Costo del Capital (K)	62
6.3.2	Flujos de Efectivo	65
6.3.3	Evaluación Financiera	71
6.3.3.1	Valor Presente (VP)	71
6.3.3.2	Valor Presente Neto (VPN)	72
6.3.3.3	Relación Beneficio Costo (RBC)	73
6.3.3.4	Tasa Interna de Retorno (TIR)	73
6.3.3.5	Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)	74
6.3.3.6	Inversión de Flujos (IDF)	74

CAPÍTULO 7

NORMATIVIDAD

7.1	Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos	77
7.2	NOM-004-SEMARNAT-2002	78
7.3	Convención de Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC)	79
7.4	Protocolo de Kyoto y Mecanismo de Desarrollo Limpio	80
7.4.1	Elementos de Proyectos del MDL	81
7.4.2	Ciclo de proyectos del MDL de acuerdo con el PK	82
7.5	Mercado de bonos de carbono	83
7.5.1	Certificados de Reducción de Emisiones (CER)	83
7.5.2	Montos Asignados Anualmente (AAU)	84
7.5.3	Unidades de Reducción de Emisiones (ERU)	84
7.5.4	Unidades de Remoción de Emisiones (RMU)	84
7.5.5	Compras Spot	84
7.5.6	Contratos de entrega futura	85
7.5.7	Opciones	85

CAPÍTULO 8

PERMISOS

8.1 Ley de la Comisión Reguladora de Energía	87
8.2 Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica	87
8.3 Guía de gestiones para implementar en México plantas de generación eléctrica que utilicen energías renovables	89
8.4 Ley para el aprovechamiento de Energías Renovables y el financiamiento de la Transición Energética	91

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES	93
---------------------	-----------

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
-----------------------------------	-----------

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1 Factores que afectan al rendimiento de los procesos de tratamiento secundario típicos	11
Tabla 2.2 Rendimientos de los procesos unitarios	11
Tabla 2.3 Concentraciones críticas de varios inhibidores químicos en el tratamiento del exceso de lodo aerobio de plantas de tratamiento	19
Tabla 2.4 Resumen de estudios de pretratamiento mecánico	23
Tabla 2.5 Resumen de estudios de pretratamiento basado en la hidrólisis térmica alcalina y ácida	23
Tabla 2.6 Resumen de estudios de pretratamiento por ozonación	24
Tabla 2.7 Resumen de las ventajas de los estudios de pretratamiento ultrasónico	25
Tabla 3.1 Composición del gas de la gasificación	27
Tabla 3.2 Comparación de biocombustibles sólidos	29
Tabla 3.3 Criterios de diseño típicos para la digestión mesofílica	34
Tabla 3.4 TRS sugeridos para el diseño de digestores de alta velocidad y de mezcla completa	35
Tabla 3.5 Destrucción de sólidos volátiles en digestores mesofílicos completamente mezclados de alta-tasa.	35
Tabla 3.6 Parámetros de diseño típicos para sistemas de mezclado en digestores	38
Tabla 4.1 Composición del biogás de diferentes fuentes y del gas natural	41
Tabla 4.2 Componentes del biogás que requieren ser removidos en la purificación del biogás	43
Tabla 4.3 Solubilidad aproximada de CO ₂ en agua	43
Tabla 4.4 Opciones más comunes de almacenamiento del biogás	48
Tabla 4.5 Capacidades de generación eléctrica	50
Tabla 6.1 Valores de DQO removida	57
Tabla 6.2 Comparación de los niveles de nutrientes entre los lodos digeridos y lodos sin tratar	61
Tabla 6.3 Comparación entre digestión y composteo para el tratamiento de desechos biodegradables	61
Tabla 6.4 Monto de Inversión	62
Tabla 6.5 Porcentaje de participación de las fuentes de financiamiento	64
Tabla 6.6 Prestamos otorgados	64
Tabla 6.7 Gastos de operación y costos directos	65
Tabla 6.8 Pronóstico del costo por KWh	66
Tabla 6.9 Ingresos por concepto de ahorro de energía eléctrica	66
Tabla 6.10 Pronóstico de los precios internacionales de la tonelada de CO ₂	67
Tabla 6.11 Ingresos por concepto de la venta de bonos de carbono	68
Tabla 6.12 Pronóstico de precios por kilogramo de composta	68
Tabla 6.13 Ingresos por concepto de la venta de composta	69
Tabla 6.14 Ingresos totales anuales	70
Tabla 6.15 Costos totales anuales	70
Tabla 6.16 Flujos de efectivo anuales	71
Tabla 6.17 Flujos acumulados actualizados	75
Tabla 6.18 Inversión de flujos	75
Tabla 7.1 Aprovechamiento de lodos digeridos	79
Tabla 7.2 Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y lodos digeridos	79
Tabla 7.3 Proyectos MDL en México	83

LISTA DE FIGURAS

	Página	
Figura 2.1	Diagrama de los pasos del procesamiento de los lodos	5
Figura 2.2	Distribución de la Planta de Tratamiento	6
Figura 2.3	Proceso de tratamiento de aguas residuales	7
Figura 2.4	Diagrama del proceso de lodos activados	8
Figura 2.5	Corte de un filtro percolador	8
Figura 2.6	Corte de un reactor biológico rotativo de contacto	9
Figura 2.7	Foto de un reactor biológico rotativo de contacto	10
Figura 2.8	Pasos subsecuentes en el proceso de la digestión	12
Figura 2.9	Producción de biogás vs TRS	14
Figura 3.1	Línea de producción para la fabricación de briquetas	28
Figura 3.2	Digestor de velocidad estándar	31
Figura 3.3	Digestor de alta velocidad	32
Figura 3.4	Digestor de dos etapas	33
Figura 3.5	Tipos de mezclado en los digestores	36
Figura 4.1	Contaminación de los pistones de un motor por silicio	46
Figura 4.2	Utilización del biogás y requerimientos actualizados	48
Figura 4.3	Sincronía entre varios motogeneradores	50
Figura 5.1	Fachada de la PTAR-CU	51
Figura 5.2	Ubicación de la PTAR-CU	51
Figura 5.3	Sedimentadores secundarios	51
Figura 5.4	Filtro biológico	51
Figura 5.5	Discos biológicos rotatorios	52
Figura 5.6	Tanque de aireación	52
Figura 6.1	Área propuesta para el sistema de bioenergía (a)	54
Figura 6.2	Área propuesta para el sistema de bioenergía (b)	54
Figura 6.3	Tren de tratamiento de los lodos activados hasta la generación de electricidad	55
Figura 6.4	Cubierta flexible para el almacenamiento del biogás	55
Figura 6.5	Medidor de biogás	55
Figura 6.6	Quemador de Biogás	56
Figura 6.7	Sistema de bombeo	56
Figura 6.8	Motogenerador Caterpillar modelo G3304	57
Figura 6.9	Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio (TIIE)	63
Figura 7.1	Certificados de Reducción de Emisiones	82
Figura 7.2	Precios y volúmenes de Ton CO ₂ comerciados en la Unión Europea	86

NOMENCLATURA

AGV	Ácidos Grasos Volátiles
AGLC	Ácidos Grasos de Larga Cadena
ATP	Trifosfato de Adenosina
BANOBRAS	Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos
BANXICO	Banco Nacional de México
BSR	Bacterias Sulfato-Reductoras
CER	Certified Emission Reductions (Certificado de Reducción de Emisiones)
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CHP	Combined Heat and Power (Calor y Energía Combinados).
CRE	Comisión Reguladora de Energía
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EIA	Energy Information Administration (Administración de la Información de la Energía)
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
FIRCO	Fideicomiso de Riego Compartido
FONCICYT	Fondo de Cooperación Internacional en Ciencia y Tecnología
GEI	Gases Efecto Invernadero
INE	Instituto Nacional de Ecología.
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MS	Materia Seca
MSI	Materia Seca Inorgánica
N	Nitrógeno
NH ₃	Amoniaco
ODS	Organic Dry Solids (Materia Seca Orgánica)
P	Fósforo
PK	Protocolo de Kyoto
POR	Potencial de Óxido-Reducción
ppm	partes por millón
PSG	Pressure Sensor Glow Plug (Sensor de Presión Resplandeciente)
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
SAT	Secretaría de Administración Tributaria
SAGARPA	Secretaria de Agricultura y Ganadería
SE	Secretaría de Economía
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaria de Energía
SPE	Sustancias Poliméricas Extracelulares
SRE	Secretaría de Relaciones Exteriores
SS	Sólidos Suspendidos
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles
SX	Siloxano
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
TRS	Tiempo de Retención de Sólidos
TRS _{des}	Tiempo de Retención de Sólidos Destruídos
UNFCCC	Convención de Cambio Climático de las Naciones Unidas