

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
GLOSARIO.....	iv
ÍNDICE DE COMPUESTOS.....	vi
ÍNDICE DE UNIDADES.....	vii
RESUMEN.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	ix
OBJETIVO GENERAL.....	x

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES

1.1 Cambio climático.....	1
1.1.1 Evolución de la temperatura terrestre.....	5
1.1.1.1 Los últimos 1,000 años.....	5
1.1.1.2 Los últimos 18,000 años.....	5
1.1.1.3 Los últimos 100 millones de años.....	6
1.1.2 Efecto invernadero.....	7
1.1.3 Gases de efecto invernadero.....	8
1.1.3.1 Bióxido de carbono.....	10
1.1.3.2 Metano.....	13
1.1.3.3 Óxido nitroso.....	15
1.1.3.4 Halocarbonos y compuestos relacionados.....	16
1.1.3.5 Hexafluoruro de azufre.....	17
1.2 Biomasa.....	19

CAPÍTULO 2 ANÁLISIS TÉCNICO

2.1 Procesos de conversión de la biomasa a energía eléctrica.....	23
2.1.1 Procesos termoquímicos.....	23
2.1.1.1 Combustión.....	24
2.1.1.2 Gasificación.....	27
2.1.1.2.1 Gasificador de flujo ascendente.....	28
2.1.1.2.2 Gasificador de flujo descendente.....	28
2.1.1.2.3 Gasificador de flujo transversal.....	29
2.1.1.2.4 Gasificador de lecho fluidizado.....	30
2.1.1.3 Pirólisis.....	32
2.1.2 Proceso bioquímico.....	34
2.1.2.1 Digestión.....	34
2.2 Manejo, tratamiento y disposición de residuos sólidos municipales.....	38
2.2.1 La jerarquía del manejo de los residuos sólidos municipales.....	40
2.2.1.1 Reciclaje.....	40
2.2.1.2 Tratamiento biológico.....	42
2.2.1.3 Tratamiento termoquímico.....	43
2.2.2 Vertedero controlado.....	44
2.2.2.1 Vertedero controlado tradicional.....	44
2.2.2.2 Vertedero de basura compactada.....	45

2.2.2.3	Vertedero de basura previamente triturada.....	45
2.2.3	Relleno sanitario.....	45
2.2.3.1	Alargamiento de la vida útil del relleno sanitario.....	46
2.2.3.2	Pulverización.....	47
2.2.3.3	Empaque.....	49
2.2.4	Descomposición de la basura.....	50
2.3	Conclusiones.....	55

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS AMBIENTAL

3.1	Principales contaminantes.....	56
3.1.1	Sostenibilidad.....	56
3.1.2	Análisis del ciclo de vida.....	58
3.2	Contaminantes en el proceso de combustión.....	59
3.3	Contaminantes en el proceso de gasificación.....	60
3.4	Contaminantes en el proceso de pirólisis.....	61
3.4.1	Contaminantes generados en el transporte de la biomasa al proceso pirolítico... 62	
3.4.2	Contaminantes en la generación de energía eléctrica a partir de aceite pirolítico 63	
3.4.2.1	Planta autosuficiente a partir de aceite pirolítico.....	64
3.4.2.2	Planta tipo TGCC con recuperación de calor.....	65
3.4.2.3	Generador diésel estacionario.....	66
3.4.2.4	Aceite pirolítico sustituyendo al carbón.....	66
3.4.2.5	Aceite pirolítico sustituyendo al gas natural.....	66
3.4.2.6	Aceite pirolítico sustituyendo al combustóleo.....	67
3.4.3	Análisis de sensibilidad sustituyendo combustibles fósiles con aceite.....	68
3.4.4	Ventajas de la pirólisis.....	70
3.5	Contaminantes en el proceso de digestión.....	70
3.5.1	Categoría de impacto.....	71
3.5.2	Métodos de uso del biogás.....	72
3.5.3	Beneficios del biogás.....	73
3.5.3.1	Beneficios humanos.....	73
3.5.3.1.1	Salud.....	73
3.5.3.1.2	Higiene.....	73
3.5.3.1.3	Ventajas de ahorro en amas de casa.....	73
3.5.3.1.4	Educación.....	74
3.5.3.1.5	Generación de empleo.....	74
3.5.3.2	Ventajas económicas y ambientales.....	74
3.5.3.2.1	Reducción de los residuos.....	74
3.5.3.2.2	Reducción del estiércol de animales.....	74
3.5.3.2.3	Reducción de la utilización del keroseno.....	74
3.5.3.2.4	Reducción del uso de fertilizantes químicos.....	74
3.5.3.2.5	Reducción del consumo de leña.....	75
3.6	Conclusiones.....	75

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS ECONÓMICO

4.1	Análisis económico en el proceso de combustión.....	77
4.1.1	Mejoras en la incineración de la biomasa.....	77
4.1.2	Incineración de R.S.M.....	77

4.2	Análisis económico en el proceso de gasificación.....	78
4.3	Análisis económico en el proceso de pirólisis.....	78
4.4	Análisis económico en el proceso de digestión.....	79
4.5	Conclusiones	81

CAPÍTULO 5 PROYECCIONES

5.1	Perspectivas actuales nacionales.....	83
5.1.1	Potencial de bioenergía en México.....	83
5.1.2	Digestores en México y el metano.....	83
5.1.3	Capacidad eléctrica a partir de la biomasa.....	85
5.1.4	Biogás de rellenos sanitarios.....	86
5.2	Perspectivas a futuro nacionales.....	88
5.3	Perspectivas actuales internacionales.....	90
5.3.1	Demanda de uso de residuos.....	90
5.3.2	Tecnologías de conversión termoquímicas.....	90
5.3.2.1	Combustión.....	91
5.3.2.2	Tratamiento de basura en hornos de incineración.....	91
5.3.2.3	Combustión dual.....	93
5.3.2.4	Gasificación.....	93
5.3.3	Tratamiento en rellenos sanitarios.....	94
5.4	El caso de Estados Unidos.....	94
5.4.1	Energía proveniente de la basura.....	94
5.4.2	Energía industrial de la biomasa.....	95
5.4.3	Combustión dual de biomasa y carbón.....	95
5.4.4	Gasificación.....	95
5.5	Perspectivas a futuro internacionales en el tratamiento de la basura.....	96

CAPÍTULO 6 ESTUDIOS DE CASO

6.1	Basura del Distrito Federal.....	97
6.1.1	Manejo de los residuos en el Distrito Federal.....	98
6.1.2	Recolección pública de los residuos sólidos.....	98
6.1.3	Estaciones de transferencia.....	98
6.1.4	Plantas de selección.....	98
6.1.5	Plantas de compostaje.....	98
6.1.6	Relleno sanitario.....	98
6.2	Gas natural.....	99
6.2.1	Generación eléctrica en México a partir de gas natural	101
6.2.2	Consumo del gas natural a futuro en México.....	102
6.2.3	Exploración y producción.....	103
6.2.4	Tuberías y almacenamiento del gas.....	103
6.2.5	El mercado mundial de gas natural.....	103
6.3	Electricidad.....	104
6.3.1	Consumo de combustibles y fuentes primarias para la generación eléctrica.....	105
6.3.2	Pronósticos de la capacidad y generación de energía eléctrica mundial.....	107
6.3.3	Tendencia mundial en la utilización de combustibles para generación eléctrica.....	108

CAPÍTULO 7	CONCLUSIONES.....	110
------------	-------------------	-----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
---------------------------------	-----

ANEXOS

ANEXO A. OTROS PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA

A.1 Fermentación.....	119
A.1.1 Análisis técnico.....	119
A.1.2 Análisis ambiental en el proceso de fermentación	121
A.1.3 Análisis económico en el proceso de fermentación.....	129
A.2 Compostaje.....	126
A.2.1 Análisis técnico.....	126
A.2.1.1 Propiedades del compost.....	126
A.2.1.2 Factores que condicionan el proceso de compost.....	127
A.2.1.3 El proceso de compostaje.....	127
A.2.2 Análisis ambiental en el proceso de compostaje.....	129
A.2.3 Análisis económico.....	129
A.3 Bioenergéticos.....	139
A.3.1 Bioenergía.....	139
A.3.2 Cultivos energéticos.....	139
A.3.3 Abastecimiento y demanda de la biomasa.....	139
A.3.4 Abastecimiento y demanda de la biomasa por región.....	140
A.4 Los biocombustibles.....	141

ANEXO B. GAS LICUADO DE PETRÓLEO

B.1 Gas licuado de petróleo (LP).....	144
B.1.1 Obtención del gas LP.....	144
B.1.1.1 Del gas.....	144
B.1.1.2 Del petróleo.....	144
B.1.2 Consumo en México.....	145
B.1.3 Consumo a futuro en México	146
B.1.4 Consumo internacional de gas LP.....	146
B.1.4.1 Norteamérica.....	146
B.1.4.2 Asia y Oceanía	147
B.1.4.3 Europa	147
B.1.4.4 Medio Oriente.....	148
B.1.4.5 Latinoamérica	148
B.1.4.6 África	148
B.1.5 Escenario a futuro internacional de gas LP.....	148

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA DE LOS ANEXOS.....	150
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1.1	Potenciales de calentamiento global para diversos horizontes de tiempo	9
Tabla 1.2	Opciones tecnológicas para el aprovechamiento de la biomasa	20
Tabla 1.3	Población que depende de la biomasa para alimentación y calefacción de hogares	21
Tabla 1.4	Capacidad y producción de energía a partir de biomasa y residuos en 2009	21
Tabla 1.5	Producción de energía primaria en México por la biomasa	22
Tabla 2.1	Composición de algunas fuentes combustibles de la biomasa	26
Tabla 2.2	Composición típica del gas de síntesis	27
Tabla 2.3	Capacidad de salida típica para diversos diseños de gasificadores	31
Tabla 2.4	Gasificación comparada con la combustión del carbón	31
Tabla 2.5	Productos obtenidos en las diferentes modalidades de pirólisis	33
Tabla 2.6	Poder calorífico de los diversos productos resultantes en la pirólisis	34
Tabla 2.7	Diversos sistemas de digestores	37
Tabla 2.8	Características de varios tipos de estiércol y eficiencia en la degradación anaerobia a gas metano	37
Tabla 2.9	Características de las plantas de compost	43
Tabla 3.1	Comparativo del análisis de ciclo de vida de las emisiones de CO ₂ en diversas técnicas de producción de electricidad	59
Tabla 3.2	Comparativo de análisis de ciclo de vida de emisiones con sistemas convencionales de generación eléctrica con fuentes de energía renovables	59
Tabla 3.3	Perspectiva de análisis del CO ₂ en los sistemas que usan biomasa	61
Tabla 3.4	Distancias de transporte de la biomasa a los sistemas de generación eléctrica	62
Tabla 3.5	Emisiones de GEI de la producción de aceite pirolítico provenientes de 4 diferentes tipos materia prima de la biomasa	64
Tabla 3.6	Distancias de transporte de la biomasa para diversos valores de f	64
Tabla 3.7	Emisiones de GEI provenientes de planta autosuficiente en la producción de aceite pirolítico	65
Tabla 3.8	Evaluación del proceso de digestión	71
Tabla 3.9	Mejor uso del biogás según su impacto ambiental	72
Tabla 3.10	Comparativo de tecnologías en su generación de contaminantes	76
Tabla 4.1	Resultados comparativos de las tecnologías en sus costos de generación eléctrica	81
Tabla 5.1	Potencial de los recursos usados para la bioenergía en México	83
Tabla 5.2	Capacidad instalada en los países de la OCDE 2005-2008 a partir de biomasa y desechos	86
Tabla 5.3	Capacidad eléctrica autorizada para cogeneración y autoabastecimiento en 2010	87
Tabla 5.4	Generación, consumo de combustibles y opciones tecnológicas para los proyectos de centrales clasificadas como nueva generación limpia, 2021-2025	89
Tabla 5.5	Energía mundial total generada en 2008 por algunas fuentes de biomasa	90
Tabla 5.6	Plantas de gasificación alimentadas por carbón y biomasa con electricidad como producto obtenido principal	94
Tabla 5.7	Generación neta de electricidad proveniente de recursos renovables por fuente	95
Tabla 5.8	Plantas gasificadoras que producen energía eléctrica	96
Tabla 6.1	Reservas de gas natural en el periodo 2009-2011	100
Tabla 6.2	Composición del gas natural	100
Tabla 6.3	Proyección del consumo de combustibles fósiles para la generación eléctrica hacia el año 2025	102
Tabla 7.1	Comparativo de diversos poderes caloríficos de los productos obtenidos de la gasificación y pirólisis con diversos tipos de combustibles	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1.1	Excentricidad de la órbita terrestre	2
Figura 1.2	Oblicuidad terrestre	2
Figura 1.3	Precesión de la Tierra	3
Figura 1.4	Energía absorbida por la superficie terrestre	3
Figura 1.5	Energía re-emitida por la superficie terrestre	4
Figura 1.6	Variaciones de la temperatura superficial en los últimos 1,000 años	5
Figura 1.7	Variaciones de la temperatura superficial en los últimos 8,000 años	6
Figura 1.8	Reconstrucción de la temperatura global de los últimos 100 millones de años	6
Figura 1.9	Perfiles verticales de concentración de vapor de agua y CO ₂	8
Figura 1.10	Concentraciones recientes de bióxido de CO ₂	10
Figura 1.11	Reconstrucción de la evolución del CO ₂ atmosférico a partir de la era industrial	11
Figura 1.12	Emisión y porcentajes de CO ₂ de algunos países en 2004	12
Figura 1.13	Emisión per cápita de CO ₂ en algunos países en 2005	12
Figura 1.14	Comparativo de fuentes y su contribución a la generación de dióxido de carbono entre México y el mundo	13
Figura 1.15	Fuentes naturales de metano	13
Figura 1.16	Fuentes antropogénicas de metano	14
Figura 1.17	Evolución de la concentración anual promedio del metano	14
Figura 1.18	Fuentes antropogénicas de emisiones de N ₂ O	15
Figura 1.19	Concentración global de algunas SAO	16
Figura 1.20	Concentraciones atmosféricas de algunos halocarbonos	16
Figura 1.21	Concentraciones del ozono estratosférico	18
Figura 1.22	Generación mundial de electricidad a partir de biomasa	21
Figura 2.1	Posibles caminos para la conversión de biomasa en energía	23
Figura 2.2	Procesos de conversión de la biomasa y productos obtenidos	23
Figura 2.3	Esquema de una planta de combustión	24
Figura 2.4	Esquema de una planta de gasificación	27
Figura 2.5	Esquema del reactor de flujo ascendente	28
Figura 2.6	Gasificador de corriente descendente o de tiro invertido	29
Figura 2.7	Esquema del reactor de lecho fluidizado	30
Figura 2.8	Capacidad mundial de generación eléctrica por gasificación en plantas GICC	32
Figura 2.9	Proyección hacia el 2015 en gasificación	32
Figura 2.10	Esquema de una planta de pirólisis	33
Figura 2.11	Pasos del proceso de digestión anaerobia	35
Figura 2.12	Diseño de control en digestor tipo intermitente y digestor tipo continuo	36
Figura 2.13	Diseño de control en digestor tipo flujo tapón y digestor tipo filtro anaerobio	36
Figura 2.14	Composición de los residuos sólidos	38
Figura 2.15	Generación de residuos sólidos municipales	39
Figura 2.16	Generación de residuos sólidos municipales por tipo de localidad	39
Figura 2.17	Manejo integral y sostenible de los RSM	40
Figura 2.18	Reciclaje de Residuos sólidos municipales por composición	41
Figura 2.19	Diferentes modalidades de rellenos sanitarios	46
Figura 2.20	Densificador de basura por trituración	47
Figura 2.21	Esquema de una formadora de pacas	49
Figura 3.1	Esquema de evaluación del ciclo de vida	58
Figura 3.2	Emisiones de gases GEI del transporte de biomasa para diferentes valores de f	64
Figura 3.3	Análisis de ciclo de vida de las emisiones de GEI para la generación eléctrica por el sistema TGCC	65

Figura 3.4	Análisis de ciclo de vida de las emisiones de GEI para el sistema con generador estacionario diésel	66
Figura 3.5	Análisis de ciclo de vida de las emisiones GEI de la combustión del aceite pirolítico en sustitución del carbón	67
Figura 3.6	Análisis de ciclo de vida de las emisiones GEI de la combustión del aceite pirolítico en una planta alimentada por gas natural	67
Figura 3.7	Análisis de ciclo de vida de las emisiones GEI en la combustión del aceite pirolítico en una planta de combustóleo	68
Figura 3.8	Análisis de ciclo de vida de las emisiones GEI en la combustión del aceite pirolítico en sustitución del carbón a diferentes distancias	69
Figura 3.9	Análisis de ciclo de vida de la combustión directa de la biomasa	69
Figura 3.10	Análisis de ciclo de vida de las emisiones GEI en la generación de electricidad por combustión directa de la biomasa y del aceite pirolítico	70
Figura 3.11	Diagrama de barras de los resultados comparativos de las tecnologías en la generación de contaminantes	76
Figura 4.1	Diagrama de barras de los resultados comparativos de las tecnologías en sus costos de generación eléctrica	82
Figura 5.1	Disposición final de los residuos sólidos urbanos 1997-2008	87
Figura 5.2	Capacidad autorizada para cogeneración y autoabastecimiento utilizando energía renovable al 2010	87
Figura 5.3	Adiciones de capacidad bruta al año 2025	88
Figura 5.4	Relación entre costos de inversión y la capacidad de salida total de capacidad de producir calor y electricidad en las calderas y lechos fluidizados	91
Figura 6.1	Población total en el Distrito Federal en 2010	97
Figura 6.2	Manejo de residuos sólidos en el Distrito Federal	97
Figura 6.3	Ubicación de las estaciones de transferencia y plantas de selección del D.F	98
Figura 6.4	Generación bruta en el servicio público por tipo de energético, 1999-2009	101
Figura 6.5	Participación por combustible fósil en la canasta para la generación eléctrica al año 2025	102
Figura 6.6	Demanda de gas natural por región 2007-20230	104
Figura 6.7	Prospectiva de la demanda mundial del gas natural por sector al año 2030	104
Figura 6.8	Consumo mundial de combustibles y utilización de fuentes primarias para generación de electricidad en, 1980-2008	106
Figura 6.9	Fuentes primarias y combustibles para generación de electricidad en países seleccionados, 2008	106
Figura 6.10	Capacidad mundial de generación de energía eléctrica por región en 2007-2025	107

GLOSARIO

AA	Acidificación del Aire
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
PA	Potencial de acidificación
BJ	Basura de Jardines y Patios
CC	Compostaje casero
CD1	Combustión Directa caso 1
CD2	Combustión Directa caso 2
CDB	Combustible Derivado de Basura
CRE	Certificado de Reducción de Emisiones
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CI	Compostaje Industrial
CI1	Compostaje Industrial 1
CI2	Compostaje Industrial 2
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COVNM	Compuestos Orgánicos Volátiles Diferentes al metano
CRE	Comisión Reguladora de Energía
DE	Desechos a Energía
DEA	Demanda de Energía Acumulativa
DOE	Department Of Energy
DOF	Diario Oficial de la Federación
DVM	Desechos Verdes Municipales
ECC	Electricidad y Calor Combinados
EIA	Energy International Association
FODSM	Fracción Orgánica de Desechos Sólidos Municipales
GBCC	Gasificación de Biomasa y Ciclo Combinado
GCC	Gasificación y Ciclo Combinado
GCCC	Gasificación del Carbón y Ciclo Combinado
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GLP	Gas Licuado de Petróleo
GNC	Gas Natural Comprimido
GNL	Gas Natural Licuado
GTC	Gasification Technology Council
IEA	International Energy Agency
MDL	Mecanismo del Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto
NGL	Nueva Generación Limpia
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PAA	Potencial de Agotamiento Abiótico
PACO	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono
PCG	Potencial de Calentamiento Global
PE	Potencial de Eutroficación
PEI	Productores de Energía Independientes
PEMEX	Petróleos Mexicanos
Pmm	Partes por Mil Millones
POF	Potencial de Oxidación Fotoquímica
Ppm	Partes por Millón
Ppmv	Partes por Millón en Volumen
REN21	Renewable Energy policy Network for the 21 st Century
RSM	Residuos Sólidos Municipales

RSU	Residuo Sólidos Urbano
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SAO	Sustancias que Agotan la Capa de Ozono
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
WCDE	World Commission on Environment and Development

ÍNDICE DE COMPUESTOS

Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio (alúmina)
Ar	Argón
C ₂ H ₄	Etileno
C ₂ H ₅ OH	Etanol
CaO	Óxido de calcio
CF ₄	Tetraflúorometano
CH ₃ OH	Metanol
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Bióxido de carbono
COS	Oxisulfuro de carbono
Fe ₂ O ₃	Óxido férrico
GT	Gases Traza
HBFC	Hidrobromofluorocarbones
H ₂	Hidrógeno
H ₂ O	Agua
H ₂ S	Ácido sulfhídrico
K	Potasio
K ₂ O	Óxido de potasio
MgO	Óxido de magnesio
N ₂	Nitrógeno
N ₂ O	Óxido nitroso
Na ₂ O	Óxido de sodio
NH ₃	Amoniaco
NO _x	Óxido nitroso
NO	Monóxido de nitrógeno
NO ₃	Nitrato
O ₂	Oxígeno
O ₃	Ozono
P	Fósforo
PFC	Perfluorocarbones
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
PO ₄	Fosfato
Sb	Antimonio

GLOSARIO DE UNIDADES

BTU
°C
°C/Km
g
g/año
ha
J
J/año
J/m³
J/Ton
Kg/cm²
Kg/día
Kg CO₂/MWh
m
m²
m³
m³/día
m³/KgSV
Mtoe
MW_{th}
Pa
PSI
Ton/día
\$ usd/J
¢usd/KWh
\$ usd/l
W
W/m²
W_{th}

SÍMBOLO

P
E
T
G
M
k

British Thermal Unit (Unidad térmica británica)
 Grados Celsius
 Grados Celsius por kilómetro
 Gramos
 Gramos por año
 Hectárea
 Joule
 Joule por año
 Joule por metro cúbico
 Joule por tonelada
 Kilogramo por centímetro cuadrado
 Kilogramo por día
 Kilogramos de bióxido de carbono por megawatt hora
 Metro
 Metros cuadrados
 Metros cúbicos
 Metros cúbicos por día
 Metros cúbicos por kilogramo de sólidos volátiles
 Mega tonelada de aceite equivalente
 Megawatt térmico
 Pascal
 Pounds per square inch (libras por pulgada cuadrada)
 Tonelada por día
 Dólares por Joule
 Centavos de dólar por kilowatt hora
 Dólares por litro
 Watt
 Watts por metro cuadrado
 Watt térmico

PREFIJO	FACTOR
Peta	10^{18}
Exa	10^{15}
Tera	10^{12}
Giga	10^9
Mega	10^6
Kilo	10^3