



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS CON GENERACIÓN DE ENERGÍA PARA EL
DISTRITO FEDERAL**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

P R E S E N T A:

I.B.I. NORMA ANGÉLICA DELGADILLO HERNÁNDEZ

TUTOR: DR. ALFONSO DURÁN MORENO

Cd. Universitaria, 2012





Universidad Nacional
Autónoma de México



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: M.C. Constantino Gutiérrez Palacios

Secretario: M.I. Carlos Villanueva Moreno

Vocal: Dr. Alfonso Durán Moreno

1^{er} Suplente: Dra. María Neftalí Rojas Valencia

2^o Suplente: Alejandra Castro González

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

Departamento de Ingeniería Ambiental, Torre de Ingeniería de la UNAM, cuarto piso, Facultad de Química, UNAM.

TUTOR DE TESIS

Dr. Alfonso Durán Moreno

AGRADECIMIENTOS

Para la realización de este trabajo fue necesaria la completa entrega y dedicación de mi parte con el compromiso siempre de retribuir un poco todo lo que mi México me ha dado. Para recorrer este largo camino lleno de dificultades y frustraciones pero también de muchas alegrías y satisfacciones quiero agradecer el apoyo incondicional de muchas bellas personas pero principalmente el de Dios, que estuvo y está conmigo en todo momento.

Agradezco a toda mi familia pero especialmente a mi mamá, mis abuelos y mis tíos, quienes siempre me han impulsado a perseguir cada uno de mis sueños, personas que han creído en mí y que jamás me han abandonado, a quienes les debo gran parte de lo que soy y a quienes les dedico con mucho cariño este trabajo que tanto esfuerzo y tiempo me ha costado.

A todos los mentores y colegas a los que admiro, personas que además de compartir sus conocimientos de una u otra forma conmigo me ofrecieron siempre su apoyo y amistad sincera. Entre ellos se encuentran el Dr. Alfonso, Abril, Naye, Adri, Chío, Manuel, Chucho, Juan Carlos Marín, Rafa, David, Jesús, Paco, Maestro Carlos Villanueva, Sofía, Lu, Juan Pablo, Jules, Lisette Lozada, Edgar Hernández, George Peña, Memo Rosales.

De forma muy especial quiero agradecer a mi admirable amigo, colega y muchas veces maestro Etzel Huízar que me ha brindado siempre su tiempo y apoyo incondicional para alcanzar esta y muchas otras metas. Igualmente agradezco a su apreciable familia su cariño y apoyo en todo momento.

A todos los ingenieros de la Torre de Ingeniería, a mis amigos de la maestría y a todos aquellos a los que conocí por cuestiones académicas y se quedaron por razones personales en mi vida como excelentes amigos.

A mis queridos amigos de años por siempre apoyarme, festejar todo conmigo y también ayudarme a levantarme de cada tropiezo, gracias Ernesto, Lucy, Pablo, Luis, Danny, Jacko, Nadia, Dana, Quique, Janeth.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por los recursos otorgados para el Proyecto DF-2008-C01-94261 relativo a Gasificación de Residuos Sólidos Urbanos con Generación de Energía Eléctrica, por la beca nacional de posgrado y por el apoyo para hacer mi estancia en el EWMCE de Canadá.

Quiero reconocer el valioso apoyo del Edmonton Waste Management Centre of Excellence de Canadá, en especial al Dr. Daryl McCartney, la Dra. Kathleen Londry, el Dr. Shouhai Yu, el Dr. Jim Shubert, la Dra. Nguyen Phuong, el Dr. Shahid Malik, el Dr. Vahid Razavi, Richard Adjei y Pamela Boylan por su confianza, amistad y aportaciones durante mi estancia en el EWMCE.

Así mismo, quiero reconocer a la gente realmente comprometida que se encuentra laborando en entidades gubernamentales de manejo y disposición de residuos sólidos urbanos del DF como son: el Ing. Ricardo Estrada, la Lic. Ma. Del Carmen Quevedo, el Ing. Javier Licea, la Arq. Guadalupe Zapien, la Biól. Judith López por su interés en cambiar la situación de nuestro país en materia de residuos, su apoyo y excelente trabajo.

También reconozco de manera personal la inspiración que provoca en mí la Dra. Cristina Cortinas, quien siempre comparte información y formación sobre residuos sólidos con estudiantes, académicos y empresarios con el único objetivo de que México se eduque y funcione.

A todos y cada uno de ustedes, de corazón GRACIAS.

Índice

1	RESUMEN.....	15
2	ABSTRACT.....	17
3	INTRODUCCIÓN	19
	3.1 Antecedentes.....	19
	3.2 Justificación del Tema	23
4	OBJETIVOS.....	25
	4.1 Objetivo General.....	25
	4.2 Objetivos Particulares	25
5	ALCANCES	26
6	METODOLOGÍA	28
	6.1 Estudio a nivel perfil	28
	6.2 Estudio a nivel prefactibilidad.....	28
	6.2.1 Caracterización de la zona de estudio.	29
	6.2.2 Antecedentes de la selección de las tecnologías a evaluar.....	31
	6.2.3 Marco teórico de las tecnologías seleccionadas: digestión anaerobia y gasificación.	32
	6.2.4 Experiencia operacional que respalda la propuesta de digestión anaerobia y gasificación de RSU.	32
	6.2.5 La Postura del GDF con respecto a tecnologías como la gasificación y la digestión anaerobia.	32
	6.2.6 Dimensionamiento de la propuesta.....	32
	6.2.7 Esquema de tratamiento de RSU propuesto.....	33

6.2.8	Aspectos ambientales del uso de digestión anaerobia y gasificación de residuos con generación de energía.....	33
6.2.9	Marco legal.....	33
6.2.10	Evaluación social.....	33
6.2.11	Evaluación económica del proyecto	34
7	RESULTADOS DEL ESTUDIO A NIVEL PERFIL	35
7.1	Planteamiento del problema	35
7.2	Antecedentes del problema	35
7.3	Identificación de la zona de influencia.....	40
7.4	Descripción de los aspectos socioeconómicos de la población afectada.	41
7.5	Descripción del manejo de los RSU en el D.F. hasta mediados del año 2011.	44
7.5.1	Generación en fuente.....	44
7.5.2	Recolección.....	46
7.5.3	Transferencia	46
7.5.4	Selección y/o tratamiento de RSU.....	48
7.5.5	Disposición Final	52
8	RESULTADOS DEL ESTUDIO A NIVEL PREFACTIBILIDAD	55
8.1	Caracterización de la zona de estudio	55
8.1.1	Cantidad de RSU separados en fuente (porcentaje de fracción orgánica, inorgánica y mezcla).	59
8.1.2	Descripción de la infraestructura y capacidad (t/d) con la que se cuenta actualmente para el tratamiento (aprovechamiento y/o valorización) de los RSU del D.F.	61
8.1.3	Cobertura actual de los servicios de tratamiento de RSU en el D.F. (%).....	63
8.1.4	Vida útil restante de la infraestructura existente (años).	63
8.1.5	Costos de operación y mantenimiento.....	63

8.2 Antecedentes de la selección de las tecnologías a evaluar.....	64
8.2.1 Alternativas de Tratamiento Térmico para los RSU del D.F.	66
8.2.2 Alternativas de Tratamiento de la fracción orgánica separada de los RSU mezclados.	67
8.3 Marco teórico de las tecnologías seleccionadas: digestión anaerobia y gasificación.	68
8.3.1 Digestión Anaerobia	68
8.3.2 Biogás generado en la digestión anaerobia.....	70
8.3.3 Gasificación.....	71
8.3.4 Gas de Síntesis como producto de la gasificación.....	73
8.4 Experiencia operacional que respalda la propuesta de digestión anaerobia y gasificación de RSU.	74
8.4.1 Digestión anaerobia de fracción orgánica de RSU.....	74
8.4.2 Gasificación de RSU mezclados	82
8.4.3 Proveedores con experiencia en tecnología de digestión anaerobia	84
8.4.4 Proveedores con experiencia en tecnologías de gasificación	88
8.5 La Postura del GDF con respecto a tecnologías como la Gasificación y Digestión Anaerobia.....	90
8.5.1 Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal.	90
8.5.2 Programa General de Desarrollo del Distrito Federal 2007-2012.....	90
8.5.3 Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Distrito Federal (GDF, 2010).....	90
8.6 Dimensionamiento de la propuesta	91
8.6.1 Área disponible en Bordo Poniente.....	91
8.6.2 Tamaño de la demanda de servicios de tratamiento y/o disposición de residuos sólidos en el D.F.	99
8.6.3 Suministros e insumos.....	99
8.6.4 Tecnologías y equipos.	100

8.6.5 Costos	102
8.7 Esquema de tratamiento de RSU propuesto.....	103
8.7.1 Descripción y consideraciones del esquema propuesto de digestión anaerobia para la fracción orgánica de RSU separada en fuente.	104
8.7.2 Estimación del área requerida para el sistema de digestión anaerobia.....	106
8.7.3 Recursos Humanos requeridos para el sistema de digestión anaerobia.	107
8.7.4 Descripción y consideraciones del esquema propuesto de gasificación para la fracción de materiales no recuperables.....	107
8.7.5 Estimación del área requerida para el sistema de gasificación.....	109
8.7.6 Recursos Humanos requeridos para el sistema de gasificación.	109
8.8 Aspectos ambientales del uso de digestión anaerobia y gasificación de residuos con generación de energía.....	110
8.8.1 La propuesta vista como proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)	111
8.8.2 Emisiones de GEI de la gasificación de residuos sólidos urbanos.....	113
8.8.3 Contaminantes típicos del syngas.....	113
8.8.4 La limpieza del syngas.....	114
8.8.5 Contaminantes típicos del biogás.....	116
8.8.6 Límites máximos de emisión a la atmósfera.	117
8.8.7 Residuos generados y su disposición.	119
8.8.8 Emisiones evitadas y bonos de carbono.	119
8.9 Marco legal.....	120
8.9.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.....	120
8.9.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y su reglamento.	120
8.9.3 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y su reglamento.	120

8.9.4 NOM-098-SEMARNAT-2002 Protección Ambiental – Incineración de Residuos, Especificaciones de Operación y Límites de Emisión de Contaminantes.	121
8.9.5 NOM-001-SEMARNAT-1996 Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	121
8.9.6 NOM-002-SEMARNAT-1996 Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.....	121
8.9.7 NOM-003-SEMARNAT-1997 Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.....	121
8.9.8 NOM-004-SEMARNAT-2002 Protección ambiental – Lodos y biosólidos – Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.	121
8.9.9 Ley Federal de Sanidad Vegetal	122
8.9.10 La convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.....	122
8.9.11 Convenio de Estocolmo.	122
8.9.12 Programa Piloto de contabilidad y reporte de Gases Efecto Invernadero en México.....	122
8.9.13 Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE).	122
8.9.14 Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética.	122
8.9.15 Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.....	123
8.9.16 Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.	123
8.9.17 Ley Federal de Derechos.	123
8.9.18 Ley del Impuesto Sobre la Renta.	123
8.10 Evaluación social	124
8.11 Evaluación económica del proyecto.....	125
8.11.1 Costo capital.....	125
8.11.2 Costos de Operación.	126

8.11.3 Ingresos	127
8.11.4 Flujo Neto de Efectivo e Indicadores financieros: TIR, VPN y B/C.	128
9 CONCLUSIONES.....	131
10 RECOMENDACIONES.....	133
BIBLIOGRAFÍA	135
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	142
UNIDADES	146
ANEXO I: Generación de energía	147
ANEXO II: Cálculo de emisiones evitadas.	148
ANEXO III. Cálculo de Bonos de Carbono.	153
ANEXO IV. Consideraciones para cálculo de FNE, VPN, TIR y B/C.....	154

Índice de Tablas

Tabla 7-1 Estaciones de transferencia del Distrito Federal.....	47
Tabla 7-2. Características principales de las tres plantas de selección del Distrito Federal.....	50
Tabla 7-3. Plantas de selección: Ingreso, recuperación y egreso	51
Tabla 8-1 Determinación de subproductos de los RSU del D.F., 2010	57
Tabla 8-2. Tipos de residuos orgánicos por fuentes generadoras para el D.F.....	59
Tabla 8-3 Análisis de las mejores fuentes de residuos orgánicos separados en origen hasta el 2010.....	60
Tabla 8-4 Características generales de las plantas de composta existentes.....	62
Tabla 8-5 Costos de los servicios de recolección, transferencia, tratamiento y disposición final de RSU en el Distrito Federal.....	64
Tabla 8-6 Propuesta de CIRE emitida por el GDF en el 2008.....	65
Tabla 8-7 Descripción de los criterios de selección	68
Tabla 8-8. Características de los procesos aerobios y anaerobios para tratamiento de la FORSU.....	68
Tabla 8-9. Composición del biogás.....	70
Tabla 8-10 Composición y parámetros de gas de diferentes fuentes	71
Tabla 8-11 Número de plantas de digestión anaerobia que procesan RSU en el mundo.	75
Tabla 8-12 Experiencias internacionales de plantas de digestión anaerobia a gran escala.	76
Tabla 8-13 Plantas instaladas de gasificación que tratan RSU	83

Tabla 8-14 Características del sitio en Bordo Poniente	94
Tabla 8-15 Meteorología de Bordo Poniente.....	97
Tabla 8-16 Contenido bromatológico de los residuos orgánicos de la CEDA	104
Tabla 8-17 Estimación de la composición de sólidos y producción de biogás de los residuos orgánicos separados de la CEDA	105
Tabla 8-18 Recursos Humanos requeridos para la planta de digestión anaerobia	107
Tabla 8-19 Personal operativo para la planta de digestión anaerobia.....	110
Tabla 8-20 Costos del bono de carbono	113
Tabla 8-21 Dióxido de carbono liberado por KWh de electricidad producida mediante gasificación	113
Tabla 8-22 Contaminantes típicos del syngas.....	114
Tabla 8-23 Contaminantes típicos del biogás.....	116
Tabla 8-24 Límites máximos de emisión de contaminantes a la atmósfera.....	117
Tabla 8-25 Caracterización de metales pesados en las muestras de las 13 estaciones de transferencia del D.F.	119
Tabla 8-26 Residuos generados en gasificación y digestión anaerobia	119
Tabla 8-27 Estimación de costo capital	126
Tabla 8-28 Estimación de costos de operación	127
Tabla 8-29 Ingresos anuales estimados de Digestión Anaerobia y Gasificación	127
Tabla 8-30 Ingresos y egresos anuales.....	128
Tabla 8-31 Cálculo de Flujo Neto de Efectivo.....	129
Tabla 8-32 Indicadores financieros del proyecto.....	130

Índice de Figuras

Figura 3-1 Tratamiento y disposición final de RSU en Europa (2010)	20
Figura 3-2 Jerarquización de la Gestión de RSU	22
Figura 7-1 Tríptico de separación de RSU en el D.F., Secretaría de Obras y Servicios, 2011	45
Figura 7-2. Ubicación de las estaciones de transferencia del D.F.....	48
Figura 7-3 Ubicación de las plantas de selección del D.F.....	51
Figura 7-4. Frente de tiro A y B del relleno sanitario Bordo Poniente Etapa IV.....	53
Figura 7-5. Distribución de Bordo Poniente	53
Figura 8-1. Diagrama típico del proceso de digestión anaerobia.....	69
Figura 8-2. Diagrama del proceso de gasificación con limpieza de gases y generación de energía eléctrica.....	72
Figura 8-3 Localización de las plantas de gasificación y digestión anaerobia existentes en EUA y Canadá	84
Figura 8-4 Ubicación del área propuesta en Bordo Poniente	92
Figura 8-5 Diagrama de bloques del tratamiento de RSU propuesto	103
Figura 8-6 Esquema propuesto de digestión anaerobia para residuos orgánicos con generación de energía eléctrica.....	106
Figura 8-7 Esquema propuesto de gasificación con limpieza de gases, generación de energía eléctrica y cogeneración.....	109
Figura 8-8 Diagrama de limpieza de syngas	115
Figura 8-9 Niveles de NO _x , HCl y SO ₂ reportados en plantas de gasificación internacionales.....	118

Índice de Fotografías

Fotografía 7-1 Calles del Centro del D.F. en Enero del 2012.	39
Fotografía 8-1 Colindancia con la planta de selección.....	97
Fotografía 8-2 Colindancia con la planta de compostaje	98
Fotografía 8-3 Terreno disponible y tipo de suelo	98

El relleno sanitario de Bordo Poniente fue el único sitio de disposición final para los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal desde 1985 hasta el 19 de diciembre de 2011. En el Distrito Federal ya no hay espacio suficiente para un nuevo relleno sanitario que albergue las aproximadamente 12,646 t/d que se dispusieron hasta entonces en Bordo Poniente, por lo que se requiere urgentemente encontrar alternativas de tratamiento y disposición final.

Si bien, Bordo Poniente ya no fungirá como relleno sanitario, cabe mencionar que cuenta con un área destinada a la instalación de plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos del Distrito Federal que aún cuenta con aproximadamente 30 hectáreas de espacio disponible y que se podrían utilizar para las nuevas alternativas de tratamiento.

En este estudio se evalúa la prefactibilidad de instalar una planta de digestión anaerobia para tratar 200 t/d de residuos orgánicos y una de gasificación para 340 t/d de residuos no aprovechables en Bordo Poniente. Para llegar a la propuesta final a evaluar, primero fue necesario realizar una actualización detallada de todos los datos de generación, tratamiento e incluso de la composición y características físico-químicas de los residuos actuales del Distrito Federal.

La actualización de datos, así como la propuesta como tal, se obtuvieron principalmente con trabajo de campo, muestreo y análisis de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal y con el valioso aporte técnico y de experiencia en el tema de los tecnólogos e investigadores del EWMCE y de autoridades de la Ciudad de Edmonton, Canadá.

Como resultado de este estudio, se concluyó que es prefactible instalar tanto la planta de digestión anaerobia como la de gasificación en el área destinada a plantas de tratamiento de RSU de Bordo Poniente. La instalación en ese sitio representaría un ahorro al no tener que pagar por el uso o compra de terreno, costo que ascendería a \$55,496,288 pesos por las 6.9 hectáreas requeridas para ambas plantas.

Ambientalmente, es prefactible si se realiza la separación de residuos en fuente y en pretratamiento, factores críticos para reducir los costos de post-tratamiento. Además, se evitaría la emisión de 441,205 t/año de CO₂ equivalente, lo que se traduciría en ingresos de aproximadamente \$165,142,912.82 anuales.

Socialmente, la propuesta generaría un mínimo de 45 empleos directos permanentes considerando solamente los puestos operativos de ambas plantas y si se instala en Bordo Poniente se enfrentaría a un menor o nulo rechazo por parte de la ciudadanía, así como de la gente que trabajaba en ese sitio y vivía de la recuperación de materiales antes de su cierre.

Económicamente hablando, si bien los costos de inversión y mantenimiento son altos, los ingresos por venta de producto, uso y venta de energía generada, venta de bonos de carbono por gases de efecto invernadero no emitidos y otros ahorros también pueden ser muy altos, obteniéndose un

valor presente neto positivo de \$909,225,907.1, la TIR es de 25.04% y el índice de Beneficio/Costo es de 1.52, con un índice de rentabilidad de 158%.

El proyecto es rentable si se logran al menos los ingresos considerados en este estudio, a los cuales se les puede añadir el ingreso por cobro de la tarifa de disposición o tratamiento de las 197,100 t/año.

Bordo Poniente landfill was the only MSW (Municipal Solid Waste) final disposal site in Mexico City from 1985 to December 19th, 2011. Mexico City has no more space for a new landfill capable of disposing of approximately 12,646 tons per day as Bordo Poniente was; therefore, it is an urgent need to find new alternatives for MSW treatment and final disposal.

Although Bordo Poniente will not work as a landfill anymore, it is worth mentioning that it has an assigned area for the installation of MSW treatment plants; this area still has 30 hectares of free space that may be used for new treatment alternatives.

This study evaluates the prefeasibility of installing an anaerobic digestion plant with capacity of 200 tons per day of source separated organic MSW and a gasification plant with capacity of 340 tons per day of non recyclable MSW in Bordo Poniente. In order to reach the final proposal, a detailed updating of Mexico City's current published information was needed, involving MSW generation, treatment, management and even its composition and physicochemical characteristics.

Both the information updating and the proposal were obtained primarily by field work, local sampling and MSW analysis, as well as with the helpful technical contribution and experience from Edmonton Waste Management Center of Excellence researchers and authorities of the City of Edmonton.

The conclusion of this study is that it is prefeasible to install both the anaerobic digestion and the gasification plants in 6.9 hectares of the assigned area at Bordo Poniente. Therefore, the installation of these plants in this area would represent a saving of \$55,496,288 mexican pesos to the capital cost.

Environmentally, the proposal is prefeasible only if MSW source and pretreatment separation is satisfactorily performed; these are key factors to reduce post-treatment costs. Furthermore, the emission of 441,205 tons per year of equivalent CO₂ would be avoided, which would lead to an income of approximately \$165,142,912.82 mexican pesos per year.

Socially, the proposal would create a minimum of 45 direct permanent jobs, considering only operative jobs. Furthermore plants' installation in Bordo Poniente would mean a minor or null rejection from the local citizens, as from people who used to live from waste collection before landfill's closure.

Economically, the investment and maintenance costs are high, nevertheless the income from the selling of by-products, the energy self consumption, the selling of energy exceeds, the selling of carbon credits and other economical benefits are far superior.

The estimated Net Present Value is \$909,225,907, the Internal Rate of Return is 25.04% and the Benefit/Cost Rate is 1.56, indicating a 158% profitability rate. In order to reach this profitability, every single project's benefit considered in this study must be realized.

Finally, the tipping fee was not included in this study; however it shall be established and taken into account by investors and authorities to obtain extra incomes.

3.1 Antecedentes

La generación de energía a partir de residuos ha demostrado ser exitosa en naciones con alta densidad poblacional, con espacios disponibles limitados para rellenos sanitarios y alta demanda de energía. Por ejemplo, países del oeste de Europa y Asia han utilizado procesos de generación de energía a partir de residuos como un método de disposición amigable con el medio ambiente, como forma de generación de energía y que además contribuye con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

La Unión Europea (UE) por su parte, se ha fijado como meta, reducir la disposición final en relleno sanitario de residuos sólidos urbanos biodegradables hasta un 65% para el año 2020 (Michaels, 2010), dando prioridad a la generación de energía a partir de residuos, así como al reciclaje y minimización de residuos en fuente. De hecho, países como Alemania ya han prohibido totalmente la disposición final de residuos biodegradables en rellenos sanitarios (Michaels, 2010).

Evidentemente, los países que aplican la generación de energía a partir de residuos, son los mismos que presentan porcentajes excepcionales de reciclaje y más minimizan la cantidad de residuos que se envían a relleno sanitario. Por el contrario, los países de Europa que más residuos disponen en relleno sanitario también presentan los índices más bajos de reciclaje y no generan energía a partir de sus residuos, como se puede ver en la Figura 3-1.

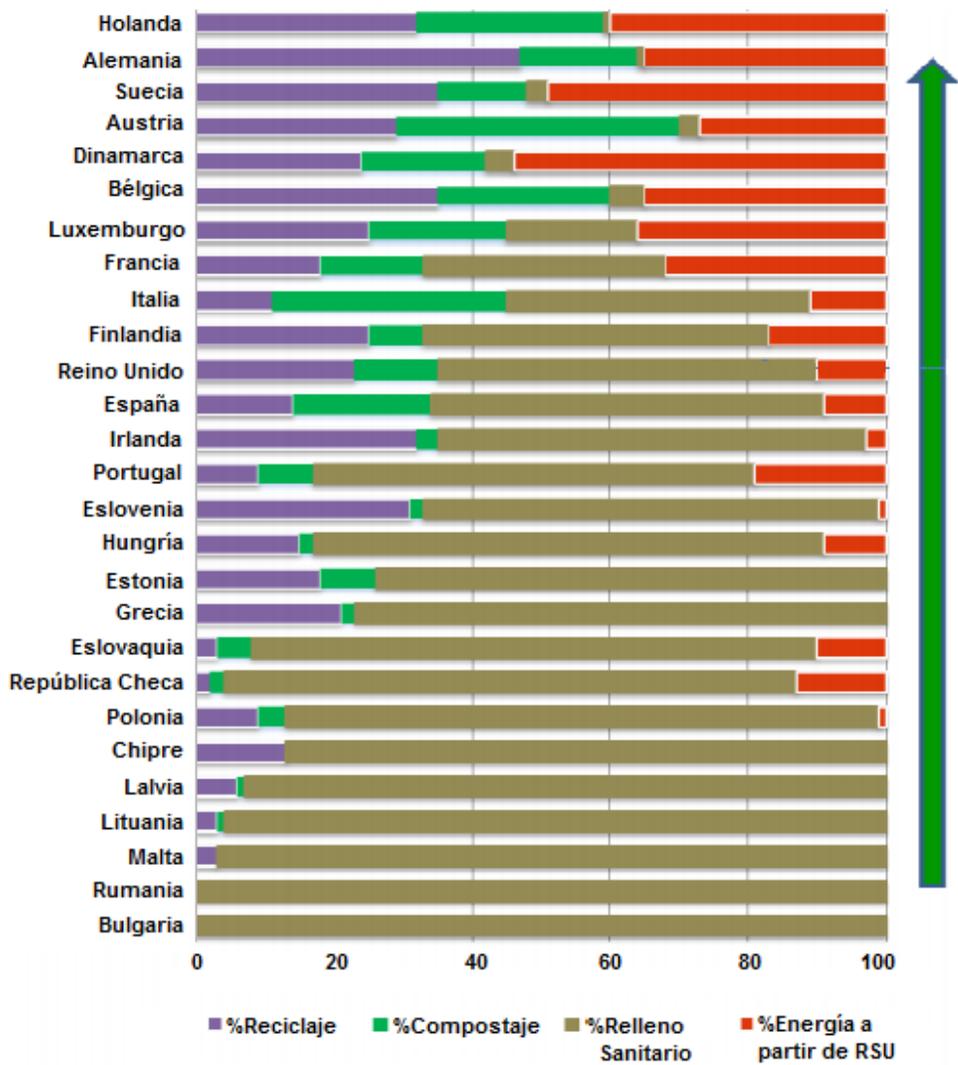


Figura 3-1 Tratamiento y disposición final de RSU en Europa (2010)

Fuente: Michaels (2010)

En una gestión ideal de RSU se jerarquizan los métodos de tratamiento y disposición final de tal forma que la reducción de RSU en fuente es el paso más importante y lo cual se debería aplicar a la mayoría de los residuos. Una vez reducido el consumo y por tanto, la generación de residuos, seguiría el reusar la mayor cantidad de residuos posibles y reciclar los que no se puedan reusar. Después y sólo para el caso de los residuos orgánicos, es mejor tratarlos biológicamente. Cabe mencionar, que existen diferentes tratamientos biológicos como son la digestión anaerobia o el compostaje, entre otros, pero entre más se puedan aprovechar los residuos, mejor será la opción de tratamiento. Por ejemplo, con digestión anaerobia se puede producir biogás, el cual presenta tres opciones posteriores a su generación:

- 1) No captarlo (lo cual no es recomendable).
- 2) Captarlo e incinerarlo.
- 3) Captarlo y usarlo para generación de energía.

Para elegir la mejor opción entre la 2 y la 3 se tiene que calcular el flujo y calidad de biogás generado, siendo lo mejor tratar de llegar hasta la generación de energía para aprovechar el poder calorífico del biogás y generar menos emisiones de gases de efecto invernadero que si se incinera el biogás.

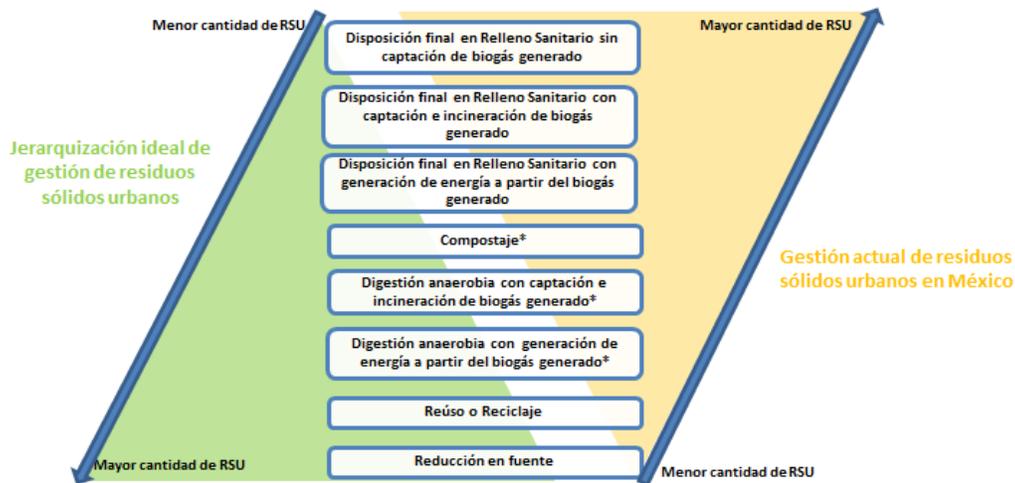
Lo mismo sucede en el caso del Relleno Sanitario, en el cual existen las mismas opciones para el biogás que ahí se genera:

- 1) No captarlo.
- 2) Captarlo e incinerarlo.
- 3) Captarlo y usarlo para generación de energía.

En la mayor parte de los estados de la República Mexicana se usan aún los Rellenos Sanitarios sin captación de biogás, incluyendo al Distrito Federal. Cabe mencionar que en estados como Nuevo León y Aguascalientes ya cuentan con sistemas de captación de biogás en sus rellenos sanitarios. Nuevo León ya aprovecha el biogás para generar energía eléctrica, la cual se utiliza para abastecer de iluminación a algunos municipios de Monterrey así como para el Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey.

En la Figura 3-2, el área verde de la izquierda muestra que la reducción en fuente, el reúso y el reciclaje de residuos es lo más importante en una adecuada gestión de residuos, mientras que la disposición de RSU en Relleno Sanitario sin captación de biogás es la opción menos deseable, ya que lejos de aprovecharse el biogás, éste se emite directamente a la atmósfera.

Igualmente, entre los tratamientos de fracción orgánica, es más deseable generar energía con el biogás producido con tratamientos como la digestión anaerobia, que además, produce un compost de mejor calidad que el producido con tratamientos como el compostaje.



*Sólo para residuos orgánicos separados en fuente

Figura 3-2 Jerarquización de la Gestión de RSU

El área amarilla de la derecha de la Figura 3-2 Jerarquización de la Gestión de RSU muestra como actualmente, en la mayor parte de México y específicamente en el D.F., los RSU son dispuestos en Relleno Sanitario, sin captación ni aprovechamiento de biogás. El tratamiento de una parte de los residuos orgánicos se realiza mediante compostaje, por lo que no se genera energía y el compost producido no puede ser vendido, ya que es considerado como de mediana calidad.

En el Bordo Poniente, actual Relleno Sanitario para los RSU del D.F., se está evaluando la posibilidad de instalar un sistema de captación de biogás para la Etapa IV, lo cual sería un primer paso hacia la modernidad, pero no es suficiente para la problemática actual. El Bordo Poniente ya no va a operar como Relleno Sanitario a partir del 2012 y en el D.F. ya no hay espacios en venta o renta que sean suficientes como para construir un nuevo Relleno Sanitario con capacidad similar a la del Bordo (Proméxico, 2008). Por lo tanto, si se realizara la captación del biogás que se genere de la etapa IV, éste se podría aprovechar para generar energía. Además, se seguiría utilizando la planta de compostaje y se podrían instalar ahí nuevas tecnologías de tratamiento de residuos, que en conjunto con las ya existentes, hagan más eficiente tanto el tratamiento como la obtención de beneficios técnicos, ambientales y económicos.

Algunas de las tecnologías que aprovechan las propiedades físico-químicas de los RSU con las características de los RSU del D.F. son las tecnologías de tratamiento térmico, las cuales ayudan a reducir el volumen de los residuos y de las cuales se puede recuperar y/o generar energía.

El tratamiento térmico de RSU, así como la digestión anaerobia entran en la categoría de tecnologías de generación de energía a partir de RSU. Las tecnologías térmicas se dividen principalmente en i) incineración; ii) gasificación y iii) pirólisis, existiendo diferentes variaciones de cada una así como combinaciones entre ellas, lo cual se explicará posteriormente más a detalle.

En diferentes partes del mundo ya existen plantas de tratamiento de RSU que usan exitosamente sistemas de generación de energía a partir de RSU como los antes mencionados. Tal es el caso del

Edmonton Waste Management Centre of Excellence (EWMCE) de Alberta, Canadá; el Complejo de Valdemíngomez en Madrid, España; el Ecoparque London Waste en Londres, Reino Unido; y el Ecoparque de la Rioja en La Rioja, España, por mencionar algunos.

Para que este tipo de plantas de tratamiento de RSU resulten exitosas, se requiere empezar por la separación de los RSU, lo cual ya es una realidad en el D.F. a partir del segundo semestre del 2011. Ahora, el siguiente paso es evaluar alternativas de tratamiento que ya han funcionado en otros países, para ver si es factible implantarlas para los RSU del D.F.

|| 3.2 Justificación del Tema

De acuerdo a lo reportado en el Programa de Gestión de RSU en el D.F. 2010, de los RSU generados en el Distrito Federal, aproximadamente el 55.58% corresponde a materia orgánica; el 20.30% son materiales reciclables con mercado nacional y el 24.12% restante son materiales que no pueden reciclarse (GDF, 2010). Hasta mediados del 2011 la mayoría de los RSU se disponían en relleno sanitario, lo cual representaba para el GDF un costo aproximado de 1,200 pesos/t (GDF, 2011) por recolección, transporte y disposición de RSU en relleno sanitario de acuerdo a las cuotas establecidas en el Código Fiscal del Distrito Federal.

Además del alto costo de operación, el pasado 22 de noviembre de 2010, el Gobierno Federal a través de la CONAGUA y el GDF, suscribieron un convenio de coordinación en el que se estableció, la obligación a cargo del GDF de reducir gradualmente el ingreso de residuos sólidos al Relleno Sanitario Bordo Poniente Etapa IV, hasta el 31 de diciembre de 2011 así como los términos y condiciones para realizar el cierre y clausura definitiva del sitio (GODF, 2011).

Con el fin de empezar a reducir la cantidad de RSU que llegaban al relleno sanitario, así como aumentar los porcentajes de reciclaje y de compostaje, era necesario llevar a cabo un programa de separación de RSU y a la vez buscar nuevas alternativas de disposición final, entre otras medidas de gestión.

En este estudio se buscaron nuevas alternativas que fueran enfocadas a reducir gastos y usar los RSU como nuevas fuentes de recursos. Con base en las plantas de tratamiento de RSU que ya operan de esta forma a nivel internacional, se realizaron una serie de estudios con un mismo fin en común; evaluar las alternativas de tratamiento de los RSU del D.F. con sus características específicas.

De los estudios de Cabrera (2010) y Palacios (2011) se concluyó que las tecnologías que mejor podrían adecuarse para el aprovechamiento de la fracción mezclada y la fracción orgánica separada en fuente de RSU son la gasificación y la digestión anaerobia respectivamente.

Paralelamente, se realizaron estudios de caracterización de los RSU del D.F. (UNAM, 2009) con el fin de actualizar los datos de generación y determinar si las propiedades físico-químicas de dichos RSU son adecuadas para ser tratadas mediante gasificación (fracción mezclada) y digestión anaerobia (fracción orgánica separada).

Por último, era necesario conjuntar como base, todos los estudios previos y analizar un proyecto específico de aprovechamiento de los RSU del D.F. que genere energía eléctrica entre otros beneficios y evaluarlo técnica, ambiental, legal, social y económicamente para decidir si es prefactible que se implemente. Este estudio servirá para evaluaciones posteriores de factibilidad que contribuyan a la toma de la mejor decisión para resolver la problemática de manejo, tratamiento y disposición de los RSU del D.F.

4.1 Objetivo General

Evaluar la prefactibilidad de instalar en Bordo Poniente una planta de gasificación y una de digestión anaerobia para tratar residuos sólidos urbanos del Distrito Federal con generación de energía eléctrica.

4.2 Objetivos Particulares

- Actualizar los datos de generación, manejo y tratamiento de residuos sólidos urbanos en el Distrito Federal mediante trabajo de campo, entrevistas, revisión de informes oficiales y visitas técnicas a instalaciones de recolección, transferencia, tratamiento y disposición final.
- Plantear un esquema de tratamiento de residuos sólidos urbanos mezclados y residuos orgánicos mediante gasificación y digestión anaerobia, respectivamente, que además conlleve generación de energía eléctrica a partir del biogás y syngas que se generen.
- Evaluar el esquema de tratamiento propuesto para definir si es prefactible para tratar residuos sólidos urbanos del Distrito Federal y residuos orgánicos separados de la Central de Abasto.
- Analizar técnica, ambiental, legal y socialmente la posibilidad de instalar en Bordo Poniente el esquema de tratamiento propuesto.

- Actualizar mediante trabajo de campo y entrevistas personales los datos de composición, manejo, tratamiento, calidad y cantidad de residuos sólidos urbanos del Distrito Federal y residuos orgánicos separados de la Central de Abasto.
- Actualizar la composición de los RSU realizando el muestreo y caracterización de residuos en las trece estaciones de transferencia del Distrito Federal.
- Definir de acuerdo a experiencias internacionales y con ayuda de tecnólogos especializados canadienses, los requerimientos técnicos necesarios para tratar residuos con gasificación y digestión anaerobia de una forma ambientalmente segura.
- Proponer una cantidad de residuos orgánicos separados de la Central de Abasto que se puedan tratar con digestión anaerobia para generar energía eléctrica a partir de biogás.
- Proponer una cantidad de residuos sólidos urbanos mezclados del Distrito Federal que se puedan tratar mediante gasificación para generar energía eléctrica a partir de syngas.
- Proponer un esquema completo que muestre la secuencia de tratamiento con digestión anaerobia y con gasificación, incluyendo limpieza de gases y generación de energía eléctrica a nivel de diagrama de flujo del proceso.
- Analizar técnica, ambiental, legal y socialmente la posibilidad de que el esquema de tratamiento propuesto se instale en el área destinada a plantas de tratamiento de residuos, ubicada en Bordo Poniente.
- Definir los principales requerimientos a cumplir en materia legal para implantar el esquema propuesto de tratamiento para tratar residuos del Distrito Federal y generar con ellos energía eléctrica con fines de autoabastecimiento en Bordo Poniente.
- Definir los contaminantes y posibles impactos ambientales generados por ambas tecnologías de estudio, su mitigación y/o control, así como la normativa ambiental a cumplir para instalar el esquema de tratamiento propuesto.
- Investigar junto con un sociólogo especializado en el tema, la situación social del manejo de RSU en el Distrito Federal, a modo de cuantificar el número de personas involucradas y determinar su disponibilidad para dejar la pepena y laborar de una forma más segura dentro de un esquema de tratamiento de RSU como el propuesto.

- Evaluar económicamente el esquema de tratamiento propuesto considerando ahorros, ingresos por venta de productos y venta de bonos de carbono, entre otros beneficios y decidir si es prefactible implantarlo para RSU del Distrito Federal.

Los proyectos, en general, se pueden realizar en tres diferentes niveles de información con la que se elaboran, lo que permite incrementar la certidumbre al momento de tomar la decisión de llevarlos a cabo o no. Los tres niveles son: perfil, prefactibilidad y factibilidad.

Como parte de este trabajo se desarrollaron actividades que pertenecen a los dos primeros niveles de estudio, el primero o nivel perfil y el segundo o nivel de prefactibilidad. A continuación se detallan los resultados que deben componer a cada uno de los niveles de estudio.

6.1 Estudio a nivel perfil

Para esta primer parte del estudio se utilizó el método de investigación bibliográfica documental por lo que se revisaron libros, artículos, catálogos, inventarios, publicaciones seriadas, informes técnicos, monografías, tesis, memorias, cotizaciones, documentación de proyectos, estadísticas, entre otros. El resultado de esta primera etapa es un “Diagnóstico de la situación del manejo y gestión de los RSU en el Distrito Federal”.

Se realizó el diagnóstico¹ de la situación del manejo y gestión de los RSU en el Distrito Federal, así como de la población afectada, lo cual se organizó y resumió en los siguientes puntos:

- a) Planteamiento del problema.
- b) Antecedentes del problema.
- c) Identificación de la zona de influencia.
- d) Descripción de los aspectos socioeconómicos de la población afectada.
- e) Descripción del manejo de los RSU del D.F. hasta mediados del 2011.

6.2 Estudio a nivel prefactibilidad

Para esta segunda parte se utilizó el método de concordancia, con el cual se destacó la relación de varios hechos observados e investigados en campo, para poder llegar a una propuesta efectiva de tratamiento de una porción de los RSU del D.F.

Los puntos que se desarrollaron fueron los siguientes:

1. Caracterización de la zona de estudio.
2. Antecedentes de la selección de las tecnologías a evaluar.
3. Marco teórico de las tecnologías seleccionadas: digestión anaerobia y gasificación.

¹Un diagnóstico es el análisis que se realiza para determinar cuál es la situación y cuáles son las tendencias de la misma. Esta determinación se realiza con base en información, datos y hechos recogidos y ordenados sistemáticamente, que permiten juzgar mejor qué es lo que está pasando.

4. Experiencia operacional que respalda la propuesta de digestión anaerobia y gasificación de RSU.
5. La Postura del GDF con respecto a tecnologías como la gasificación y la digestión anaerobia.
6. Dimensionamiento de la propuesta.
7. Aspectos ambientales del uso de digestión anaerobia y gasificación de residuos con generación de energía.
8. Marco legal.
9. Evaluación social.
10. Evaluación económica del proyecto.

6.2.1 Caracterización de la zona de estudio.

En este apartado se realizó un muestreo de RSU en cada una de las 13 Estaciones de Transferencia (ET) del D.F.

El muestreo se realizó con base en métodos dictados por la normatividad mexicana, la cual describe procedimientos específicos para muestreo, determinación de peso volumétrico y cuantificación de subproductos de los residuos.

Para realizar el muestreo de RSU de las 13 ET del D.F. las actividades que se realizaron fueron:

- a) Acondicionamiento del sitio de muestreo: esta actividad implica la limpieza del área de muestreo, delimitación de la superficie para realizar la técnica de cuarteo, y ubicación de equipo como balanzas y toneles en área de tolvas.
- b) Tamaño de muestra: se definió un tamaño de muestra representativo de cada ET con base en el ASTM D 5231 – 92 Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste (15). Se muestrearon 15 camiones por cada ET.
- c) Homogeneización de los RSU: esta actividad se realizó con base en la norma NMX-AA-015. Se vierten los residuos extraídos de los camiones recolectores en una superficie plana y horizontal de 6 x 6; posteriormente, con pala y/o biello, se revuelve toda la mezcla de residuos, se divide la muestra en 4 partes iguales sobre la superficie y se retiran dos partes opuestas. Esta operación se repite hasta tener un mínimo de muestra de 50 kg.
- d) Toma de muestra para trituración y análisis de laboratorio: De las partes descartadas en el primer cuarteo se toman 10 kg de muestra, se empacan en una bolsa de polietileno debidamente sellada y etiquetada, para posteriormente enviarla a trituración y pulverización, condiciones necesarias para la posterior determinación de humedad, cenizas y poder calorífico en el laboratorio de las instalaciones de la Facultad de Química de la UNAM. La preparación de la muestra para su análisis en laboratorio se realizó con base en la NMX-AA-052.
- e) Determinación de peso volumétrico: con base en la NMX-AA-019-1985, para esta determinación, porciones de masa conocida, tomadas de cada cuarto (una vez realizado el

cuarteo), se colocaron en un tonel de 200 L previamente tarado y etiquetado. Se dejó caer el tonel (3 veces) desde una altura aproximadamente de 10 cm a nivel del suelo, se procedió a llenar nuevamente el contenedor a ras de la superficie y utilizando una rastra se eliminan aquellos residuos que en su superficie sobresalían, posteriormente se pesa el tonel y la división de la masa de residuo entre el volumen del contenedor dio la relación de peso volumétrico correspondiente. El procedimiento se repitió para corroborar que el peso volumétrico determinado era correcto.

- f) Selección y cuantificación de subproductos: con base en la NMX-AA-022-1985 se tomó una muestra de 50 kg, cantidad mínima requerida para que la selección y cuantificación de subproductos sea representativa de la muestra total. A continuación se desplegó una mesa de trabajo con charolas para cada uno de los subproductos presentes en la RSU, los subproductos encontrados se encuentra enlistados en la norma. Dicha lista se modificó añadiendo algunos subproductos recurrentes hallados y eliminando otros que no fueron encontrados durante el muestreo.
- g) Eliminación de la fracción de rechazo: una vez determinado lo anterior, se prosiguió a la eliminación de la fracción de rechazo, la cual se depositó en las tolvas de la correspondiente ET de muestreo.

Para saber si los RSU del D.F. son buenos candidatos para ser sometidos a un tratamiento de conversión térmica, las muestras tomadas en cada ET se enviaron al laboratorio de la Facultad de Química para realizar las siguientes determinaciones:

1) Composición elemental

Esta determinación se hizo mediante un Analizador Elemental modelo EA/NA1110 de la marca Fison, el cual basa su funcionamiento en la combustión de la muestra a aproximadamente 1000°C, en una atmósfera de oxígeno y cuantificando en porcentaje másico la composición elemental (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre) mediante los gases productos de su combustión: CO₂, H₂O y N₂.

2) Cuantificación de la fracción orgánica contenida.

Con base en la norma NMX-AA-016-1984 de Determinación de humedad, se tomó una muestra representativa de aproximadamente 15 a 30g y se colocó en un una charola de aluminio. La muestra se sometió a 120 °C en estufa durante un periodo de 1 a 3 horas. Finalmente se tomó el peso de la muestra seca y la cantidad de humedad se obtuvo mediante diferencia de pesos.

3) Contenido de cenizas.

Con base en la norma NMX-AA-018 la muestra se secó y pulverizó, posteriormente se tomaron entre 1.5 y 4 g de muestra seca colocándolos en crisoles de porcelana para calcinar en 2 etapas, la primera en una parrilla a 300°C (573 K), y la segunda en una mufla a 800°C (1073 K).

4) Determinación del poder calorífico.

Se utilizó un calorímetro diferencial de barrido modelo DSC 1 de la marca Mettler Toledo. El equipo mide el flujo de calor, ya sea consumido o liberado, por la muestra al ser elevada la temperatura de la muestra en un barrido de 120°C a 500°C, finalmente integrando estos datos fue obtenido un valor de poder calorífico para cada una de las muestras representativas de las estaciones de transferencia.

Una vez obtenidos los resultados de caracterización, se analizaron y complementaron con los datos reportados en inventarios anteriores de RSU de la Ciudad de México, el historial de Programas de Gestión de RSU del Distrito Federal y otras fuentes citadas más adelante. Los puntos que se desarrollaron en esta parte del estudio fueron:

- a) Actualización de datos de composición de RSU generados en el D.F. que llegan a las estaciones de transferencia.
- b) Actualización de la cantidad y calidad de subproductos de los RSU del D.F. y cálculo del peso volumétrico.
- c) Actualización de la cantidad de RSU del D.F. separados en fuente (por ciento de fracción orgánica, inorgánica y mezcla).
- d) Descripción de la infraestructura y capacidad (t/d) con la que se cuenta actualmente para el aprovechamiento² y/o valorización³ de los RSU.
- e) Actualización de los datos de cobertura actual de los servicios de tratamiento de RSU en el D.F. (%).
- f) Vida útil restante de la infraestructura existente (años).
- g) Costos de operación y mantenimiento actuales de manejo de RSU en el D.F.
- h) Cuantificación del personal que trabaja en el servicio y análisis de los servicios de tratamiento de RSU con que se cuenta actualmente en el D.F.

6.2.2 Antecedentes de la selección de las tecnologías a evaluar.

En esta sección se analizaron estudios previos comparativos de diferentes tipos de tratamiento de RSU, tomando como base los resultados de los trabajos de investigación de Cabrera (2010) sobre alternativas de tratamiento térmico y el de Palacios (2011) sobre los diferentes tipos de tratamiento para fracción orgánica de RSU.

²Un residuo es aprovechable si tiene características atractivas para alguien, sin embargo, eso no lo vuelve necesariamente valorizable.

³Un residuo valorizable es aquel por el que alguien está dispuesto a pagar, es decir, que existe una demanda traducida en una remuneración económica.

Después de analizar ambos estudios, se determinaron los 6 criterios más importantes a considerar para la selección de las dos tecnologías más adecuadas para el tratamiento térmico y el tratamiento biológico de la fracción mezclada y la orgánica respectivamente: el tipo de residuos que tratan, su desarrollo comercial, la recuperación/utilización de la energía, su impacto ambiental, credibilidad en los proveedores de la tecnología y algunas exclusiones.

6.2.3 Marco teórico de las tecnologías seleccionadas: digestión anaerobia y gasificación.

En esta sección se describen los puntos teóricos más importantes a considerar de cada una de las tecnologías seleccionadas.

6.2.4 Experiencia operacional que respalda la propuesta de digestión anaerobia y gasificación de RSU.

Para evaluar la experiencia a nivel mundial de la tecnología de digestión anaerobia y la de gasificación se establecieron 5 criterios de análisis:

- a) Que la tecnología trate el tipo de residuo de interés.
- b) Que la tecnología ya se esté aplicando comercialmente y esté actualmente operando con capacidad instalada de mínimo 200 t/d.
- c) De preferencia el proceso debe ser un productor neto de energía.
- d) El proceso debe ser capaz de cumplir con los requerimientos más estrictos de emisiones a la atmósfera y no debe generar residuos peligrosos que sean difíciles de manejar o de disponer.
- e) Los proveedores de dichas tecnologías deben ser organizaciones serias con las bases de ingeniería y recursos económicos suficientes para diseñar, construir, administrar y garantizar la tecnología que ofrecen.

6.2.5 La Postura del GDF con respecto a tecnologías como la gasificación y la digestión anaerobia.

Para saber si la propuesta de este estudio tiene cabida en los posibles proyectos a futuro del GDF, se realizó una búsqueda bibliográfica de todos los programas y planes oficiales de la entidad.

6.2.6 Dimensionamiento de la propuesta.

Finalmente, para el establecer el tamaño y capacidad de los sistemas de gasificación y digestión anaerobia para residuos del D.F. se consideraron los siguientes criterios:

- a) Área disponible en Bordo Poniente para plantas de tratamiento de residuos sólidos.

- b) Tamaño de la demanda de servicios de tratamiento y/o disposición de residuos sólidos en el DF.
- c) Suministros e insumos.
- d) Tecnologías y equipos.
- e) Costos.

6.2.7 Esquema de tratamiento de RSU propuesto

Con base en todas las secciones previas, se propone un esquema de tratamiento de RSU a nivel de diagrama de bloques, el cual indica las entradas y salidas del sistema en cuestión de insumos, residuos, productos y subproductos.

6.2.8 Aspectos ambientales del uso de digestión anaerobia y gasificación de residuos con generación de energía.

Una vez establecida la dimensión de la propuesta se analizaron todos los aspectos ambientales involucrados, los controles operacionales a considerar y los posibles beneficios ambientales derivados del uso de las tecnologías que pueden traducirse también a beneficios económicos.

Los aspectos y datos ambientales se obtuvieron directamente de la información proporcionada por los proveedores, reportes publicados o de plantas que ya se encuentran en operación o en construcción con pruebas piloto.

6.2.9 Marco legal.

La revisión del marco legal involucra la investigación de la normatividad aplicable para instalar los dos sistemas propuestos en el Bordo Poniente. Así mismo, se incluyen todas aquellas leyes o reglamentos que se puedan relacionar con algún beneficio adicional o limitación importante para la realización del proyecto que se propone en este estudio.

6.2.10 Evaluación social.

En este apartado se determinó la conveniencia para la sociedad, para el GDF y/o posibles inversionistas, de llevar a cabo la instalación de una planta con las tecnologías de tratamiento de estudio en el D.F. Para ello se realizó una investigación de la situación social⁴ del manejo de RSU en el Distrito Federal junto con el sociólogo del Instituto de Investigaciones Sociales de la UNAM Héctor Castillo Berthier, especialista en el tema.

De esta investigación se obtuvo el número de personas involucradas en la pepena de RSU en el Bordo Poniente. Así mismo, se determinó la disponibilidad de esa gente para dejar de vivir de la pepena y laborar de una forma más segura dentro de un esquema de tratamiento de RSU como el propuesto.

⁴La evaluación social involucra la identificación de efectos sociales y externalidades derivadas de la implementación de un proyecto, las cuales pueden o no ser susceptibles de cuantificación.

6.2.11 Evaluación económica del proyecto

Para la evaluación económica del proyecto se estimaron los costos de inversión, operación y mantenimiento de todos los equipos principales de los sistemas de digestión anaerobia y gasificación, incluyendo su pretratamiento, limpieza de gases y sistema de generación de energía eléctrica.

Se utilizaron como base los datos proporcionados por tecnólogos y especialistas para estimar insumos anuales, generación y consumo de energía eléctrica, emisiones y residuos, con lo cual se pudo completar la información encontrada bibliográficamente, generar un flujo de efectivo durante un periodo de evaluación de 10 años y calcular la rentabilidad del proyecto.

Como resultado de esta primera etapa se presenta el “Diagnóstico de la situación del manejo y gestión de los RSU en el Distrito Federal”.

El Diagnóstico⁵ se organizó y resumió en los siguientes puntos, los cuales se describen abajo:

- a) Planteamiento del problema.
- b) Antecedentes del problema.
- c) Identificación de la zona de influencia.
- d) Descripción de los aspectos socioeconómicos de la población afectada.
- e) Descripción del manejo de los RSU del D.F. hasta mediados del 2011.

7.1 Planteamiento del problema

El relleno sanitario Bordo Poniente tiene una extensión total de 1,000 hectáreas de las cuales se han utilizado 721 en cuatro etapas. La vida útil de las 3 primeras transcurrió de 1985 a 1994, por lo que en 1995 entra en operación la IV y última etapa (CNA, 2010).

En septiembre de 2004, la SEMARNAT resolvió el cierre de la IV etapa del relleno sanitario Bordo Poniente, en un plazo de 3.85 años, mismo que se cumplió el 31 de julio del 2008. El 19 de agosto del 2008, se otorgó una ampliación de plazo hasta el 15 de enero de 2009, para que de manera gradual y sin afectar a la población del D.F., se implementaran las medidas necesarias para la suspensión definitiva de recepción de residuos y el desarrollo de los planes, programas y proyectos necesarios para la disposición de residuos sólidos urbanos (CNA, 2010).

Por último, el 22 de noviembre de 2010, el GDF se comprometió mediante convenio, a que a partir del 31 de diciembre de 2011 ya no dispondría RSU en la Etapa IV del relleno sanitario Bordo Poniente, pudiendo procesar solo los residuos sólidos orgánicos separados en la planta de compostaje (CNA, 2010).

7.2 Antecedentes del problema

El tema de los RSU en el D.F. ha tomado fuerza en los últimos tres años debido al compromiso del GDF por cerrar el Relleno Sanitario de Bordo Poniente etapa IV. Aunque la preocupación existe desde entonces, no se ha establecido prioridad alguna para actualizar oficialmente todos los datos y cambios ocurridos en la gestión de RSU en el D.F.

En el 2011 ocurrieron la mayor cantidad de cambios de generación, separación, recolección, tratamiento y disposición en la historia de los RSU del D.F., sin embargo, no se realizó ninguna

⁵Un diagnóstico es el análisis que se realiza para determinar cuál es la situación y cuáles son las tendencias de la misma. Esta determinación se realiza con base en información, datos y hechos recogidos y ordenados sistemáticamente, que permiten juzgar mejor qué es lo que está pasando.

actualización oficial por parte de las autoridades en el tema, por lo que en este estudio se recurre frecuentemente a los datos publicados en el 2010.

De acuerdo a lo reportado en el Programa de Gestión de RSU en el D.F. 2010, en la Ciudad de México se generaron aproximadamente 12,646 t/d pero diariamente llegaban alrededor de 13,401 t/d a disposición final. Esta diferencia entre la cantidad que se generaba y la que se disponía se debía a varias irregularidades en el manejo de los RSU en el Distrito Federal.

El D.F. es la entidad que ocupa el segundo lugar a nivel nacional en cuanto a número de habitantes, los cuales ascienden a 8,851,080 según el reporte 2010 (INEGI, 2010). Por el simple número de habitantes de la ciudad, y los residuos generados de 12,646 t/d se estima que la generación promedio por habitante es de 1.49 kg/hab/día⁶, cifra muy superior a otras entidades. Dicha diferencia se debe principalmente a la contribución en generación de residuos de la población flotante⁷ (estimada en 3,000,000 de personas diariamente) (INEGI, 2010).

Todavía en el 2010, el descontrol de la entrada de RSU provenientes del Estado de México y población flotante era un problema que afectaba desde la primera etapa de la gestión de los RSU⁸, la generación en fuente. El otro problema grave en la primera etapa de gestión, era que no se llevaba a cabo el programa de separación de RSU, razón por la cual se recuperaba un porcentaje muy bajo de todos los RSU generados, yendo la mayor parte de los RSU generados al Relleno Sanitario.

Cabe mencionar que en el segundo semestre del 2011 cesó se logró atacar ambos problemas por orden del GDF como primeras medidas para disminuir la cantidad de RSU enviadas al Bordo Poniente. Por una parte se cesó la aceptación de RSU provenientes del D.F. y por otro, se empezó a llevar a cabo el programa de separación de residuos en toda la entidad federativa.

En el Programa de Gestión de RSU en el D.F. 2010, se publicó que de los RSU generados en el D.F., el 55.58% (6,948 t/d) correspondía a materia orgánica, de lo cual sólo se separaban 100 t/d que se enviaban a compostaje; el 20.30% (2,538 t/d) eran materiales reciclables con mercado nacional, de lo cual sólo se separaban 1,633 t/d entre lo recuperado en fuentes de generación, en camiones recolectores y en plantas de selección. Por último, un 24.12% (GDF, 2010) de los RSU correspondía a otros materiales que eran susceptibles de ser reciclados pero que por no contar con mercado o no cumplir las condiciones adecuadas de calidad para ser recicladas (debido a la mezcla con RSU orgánicos y demás), no se recuperaban y se enviaban a disposición final.

A mediados del 2011, si bien, los datos no fueron oficialmente actualizados ni por el GDF ni por la SMA, se manejaron datos en ruedas de prensa, entrevistas directas con personal de la DGSU, periódicos, etc., que reflejaron los cambios en los porcentajes de separación de los RSU. En Junio del

⁶ Estimación propia para el año 2011 con base en las referencias CONAPO (2009), SMA (2008) e INEGI (2010).

⁷ Población flotante es aquella que no pertenece a la entidad federativa en cuestión, pero que acude a ella ya sea de paso, para asistir a sus trabajos u otras circunstancias.

⁸ Las etapas de gestión de los RSU son: 1) Generación en fuente, 2) Recolección, 3) Transferencia, 4) Selección y/o Tratamiento y 5) Disposición final.

2011, se empezaron a recibir y tratar 1,200 t/d de residuos orgánicos en la planta de composta de Bordo Poniente (López, 2011). Con el programa de separación, sin duda lograron desviarse gran parte de los RSU, la mayor parte de las ganancias se las llevaron los trabajadores de recolección, ya que recibían los RSU separados y más limpios, e incluso por los residuos orgánicos separados recibían un pago por parte del GDF.

Desafortunadamente desde el cierre de la Etapa IV de Bordo Poniente, lo cual se llevó a cabo el 19 de Diciembre de 2011, no se cuenta aún con una alternativa para tratar ni disponer los RSU del D.F. A inicios del 2012 el GDF empezó a negociar con rellenos sanitarios privados del Estado de México, los permisos temporales para disponer ahí los RSU, mientras las calles del D.F. se llenan de RSU que no están siendo recolectados y mientras el trabajo de separación de meses atrás se pierde ante la desesperación de falta de planeación del cierre del Relleno Sanitario más grande del mundo.



Fotografía 7-1 Calles del Centro del D.F. en Enero del 2012

Fuente: (MSN, 2012)



Fotografía 7-2 Calles del Centro del D.F. en Enero del 2012.

Fuente: (MSN, 2012)

7.3 Identificación de la zona de influencia

El Bordo Poniente se encuentra en el municipio de Netzahualcóyotl, Estado de México, desde sus inicios fue proclamado por la CONAGUA como sitio para tratamiento y disposición final de los RSU del D.F.

El cierre de Bordo Poniente influye entonces en el Distrito Federal y en el Estado de México, que al no contar aún con un sitio propio de disposición final para RSU del D.F. que cumpla con la NOM-083-SEMARNAT-2003⁹ ha comenzado a generar tiraderos clandestinos, que afectarán a la población de ambas entidades. Además, se contaminarán suelos y acuíferos, lo cual extenderá los efectos negativos hacia otras entidades del país.

Cabe mencionar, que aunque este estudio tenga como objetivo encontrar y evaluar posibles soluciones al problema de disposición y aprovechamiento de RSU del D.F., ninguna tecnología de las que se han investigado hasta el momento tiene la capacidad de tratar en una sola unidad, las cantidades totales de RSU que se generan diariamente en el D.F.

Por lo anterior, se debe atacar el problema en cada una de las etapas de gestión de los RSU, minimizar al máximo la generación en fuente, promover y respetar la separación tanto en fuente como durante la recolección y transferencia, tratar y aprovechar los RSU que no se hayan recuperado, mediante tecnologías como las propuestas en este estudio y por último, enviar a disposición final una mínima cantidad de RSU resultante.

En este caso, sólo se evalúan alternativas para la parte de tratamiento y aprovechamiento de RSU, considerando que después de una buena gestión de RSU, en todas sus etapas, la cantidad de RSU a tratar debería ser mucho menor a la que se genera diariamente.

Partiendo entonces de la delimitación anterior del problema, la zona de estudio es el Distrito Federal, es decir, se estudiarán los RSU de dicha entidad y las zonas o sitios de influencia que se establecieron son:

- 1) Sitio de instalación de la infraestructura de tratamiento de RSU propuesta en este estudio.
El sitio de estudio para instalar una planta de gasificación y una de digestión anaerobia es Bordo Poniente.
- 2) Zonas o sitios del D.F. de las que se obtendrá la materia prima (RSU).
Para la selección de estas zonas se analizaron varias fuentes posibles en el estudio a nivel prefactibilidad.
- 3) Zonas o sitios del D.F. susceptibles de consumir y/o adquirir los productos y subproductos del tratamiento de los RSU.

⁹ Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de protección ambiental para la selección de sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y de manejo especial.

Se analizaron varias alternativas en el estudio a nivel prefactibilidad.

Los tres puntos se desarrollaron después de concluir el estudio a nivel perfil, una vez que ya se tenía una idea de la tecnología a usar, especificaciones de los RSU a tratar, así como de los productos y subproductos que se podrían obtener (ver estudio a nivel prefactibilidad).

7.4 Descripción de los aspectos socioeconómicos de la población afectada.

Si bien, este trabajo tiene como objetivo evaluar la posibilidad de implementar tecnologías de tratamiento de RSU del D.F., es importante establecer cuál es la población que se vería afectada ya sea positiva o negativamente con la implementación de dichas tecnologías.

Se ha aclarado que el uso de tecnologías de tratamiento de RSU para su aprovechamiento y disminución de volumen no resuelve el problema de la generación excesiva de RSU, por lo que sólo se analiza el tratamiento de una parte de los RSU del D.F. Sin embargo, aunque la cantidad de RSU tratados sea pequeña, habrá siempre una población afectada que hay que considerar.

En el Distrito Federal existe una cantidad considerable de gente que depende económicamente hablando de los RSU. De acuerdo a los estudios de Castillo (1999) él reportó que cerca de 15 mil trabajadores participaban en la recolección de residuos (choferes, barrenderos, ayudantes y macheteros), de los cuales 11,000 eran empleados con un salario fijo y los cuatro mil restantes (voluntarios) no cobraban ningún salario obteniendo sus ingresos separando y vendiendo materiales y viviendo en circunstancias deplorables de pobreza, suciedad y privación de atención y servicios públicos, pero que consideraban, como su única y posible fuente segura de ingresos (Castillo, 1999).

Para el año 2005, el Gobierno de la Ciudad contaba con 2,101 camiones, cada uno tenía asignado 1 chofer, además, había aproximadamente 3,400 ayudantes y 4,000 voluntarios sin sueldo, así como 8,000 barrenderos. Esto significa que de esta economía informal, se mantenían directamente unas 20,000 personas. Entre jefes de familia y sus familiares, se puede decir que en conjunto un promedio de 83,500 personas dependen económicamente del servicio de recolección de basura, únicamente en el Distrito Federal (UNAM, 2009).

Ahora, considerando que Bordo Poniente es el sitio que se analizará para instalar las tecnologías de tratamiento de RSU, la sociedad que vivía y trabajaba en Bordo Poniente hasta antes de su cierre en diciembre del 2011, también se verá afectada. Esta población se estudió en el año 2009, en conjunto con el sociólogo Héctor Castillo del Instituto de Investigaciones Sociales de la UNAM, de lo que se obtuvo la siguiente información.

La población se encontraba organizada en dos principales grupos:

- 1) Pепенadores, los cuales se encontraban distribuidos a su vez en cuatro grupos:

- a) Trabajadores de la planta de selección de Bordo Poniente, que a su vez se subdividían en: i) Agremiados al Frente Único de Pepenadores A.C. (AFUPAC) y ii) No agremiados.
- b) Pepenadores de la Etapa IV del relleno sanitario de Bordo Poniente.
- c) Empleados directos del Departamento del Distrito Federal (DDF).
- d) Empleados de empresas privadas que operaban en el interior de Bordo Poniente.

Una gran cantidad de los trabajadores de Bordo Poniente, se concentraban en la planta de selección (400 personas) y en el área de relleno sanitario (200 personas). De los 400 que trabajaban en la planta de selección, sólo algunos eran pepenadores y además estaban agremiados y de los del relleno sanitario ninguno estaba agremiado. El no estar agremiados no les permitía gozar de beneficios como un transporte especial desde sus casas hasta su lugar de trabajo y casas habitación. En cuanto a empleados directos del GDF, eran 54 empleados con base.

La labor de recuperar materiales en Bordo Poniente se encontraba organizada en diferentes rangos, en los cuales cambiaba tanto la actividad a desarrollar así como la ganancia y reconocimiento social de su grupo.

A continuación se enlista y describe la estratificación de la organización que existía de pepenadores:

- Concesionario o líder, tenía la función establecer los contactos políticos y económicos necesarios al exterior del tiradero.
- Secretario, era el representante permanente del líder en el tiradero y actúa como encargado general.
- Los cabos, establecían el contacto directo con los pepenadores, responsables de organizarlos laboralmente y llevaban una especie de censo de las familias que les correspondían, además de vigilar la convivencia entre ellos.
- Los pepenadores, eran los encargados de la separación y acumulación de materiales reciclables, es decir, la mano de obra.
- Los pesadores se encargaban de llevar un control de las toneladas de basura que entran y que salen diariamente durante todo el día. Dentro de la Planta de Selección y del Relleno Sanitario de Bordo Poniente, los pesadores eran pagados y administrados por el GDF.
- Los maquinistas, eran los que manejaban maquinaria pesada y estaban a cargo de su equipo, su gasolina (1,000 litros de DIESEL), así como de su mantenimiento. Este personal, junto con un grupo de mecánicos disponibles para cualquier eventualidad eran contratados por el propio GDF.
- Los recolectores, se encargaban principalmente de juntar en un solo lugar los materiales que sus compañeros habían separado, dependiendo de su tipo, para después llevarlos al espacio destinado para su acumulación y su procesamiento.
- Los lavadores, se dedicaban a limpiar de manera meticulosa, aquellos objetos que habían sido recuperados y que para poder ser reciclados necesitan estar libres de suciedades, lo que significaba un aumento en su valor.

- Los separadores, eran los encargados de dividir los materiales que pertenecen a un mismo tipo, ya sea por color, grosor o tamaño, como por ejemplo el plástico, para después ser procesados por los moledores.
- Los moledores, estaban a cargo de triturar los materiales, principalmente el plástico y el vidrio, para así, poder venderlo directamente con la empresa recicladora.
- Comerciantes, su función era solamente la comercialización de los materiales reciclables recuperados (chóferes, macheteros de camiones recolectores de las delegaciones, así como encargados de locales de compra de materiales reciclables).

El trabajo en el relleno sanitario rendía hasta mediados del 2011, un salario variable ya que dependía de los materiales que se recuperaban. Los pepenadores tenían la posibilidad de aumentar los ingresos por venta de alguno de los productos recuperados como chácharas, o algún metal. Los ingresos solían ser de \$80-100 diarios, y llegaban a \$500-750 semanales más el incremento que supone la comercialización de algunos materiales (UNAM, 2009).

A partir de la separación de RSU que se empezó a llevar a cabo a mediados del 2011, se desconoce la forma en que operaban las personas al interior de Bordo Poniente, ya que los materiales separados ya no llegaban al relleno sanitario, siendo los principales beneficiados los trabajadores del servicio de recolección.

El tiempo de vida de la gente de la planta de selección había aumentado a más de 70 años en promedio, los pepenadores ya tenían una casa bien construida con todos sus servicios. Por esta razón, dentro de Bordo Poniente, se podían encontrar personas de una edad avanzada que llevan más de 70 años desempeñando la misma actividad, sin tener algún beneficio por su antigüedad.

Así, los pepenadores a pesar de contar con mejores condiciones de trabajo en la planta de selección en comparación con el relleno sanitario, al no sufrir las inclemencias, sus ingresos no eran homogéneos e iban siempre en proporción al dominio de sus líderes. Además, los pepenadores seguían siendo manipulados como apoyo de eventos políticos sin recibir un beneficio tangible.

Algunos otros pepenadores habían preferido contratarse como mano de obra en AVANGARD¹⁰, operando la maquinaria de esta empresa para procesar los materiales dentro de la planta obteniendo un salario fijo y prestaciones de ley en comparación con el trabajo en el gremio.

Principales problemas de salud de los pepenadores.

Uno de los principales problemas dentro del gremio que afectaba el desarrollo y convivencia en la planta de selección, era la presencia de un alto nivel de muertes de pepenadores debido al alcohol, o bien, a enfermedades relacionadas con él.

¹⁰ AVANGARD es una empresa de capital español, dedicada al acopio y reciclaje de residuos plásticos que tiene la concesión de comprar casi todos los materiales plásticos que se recuperan en la planta de selección de Bordo Poniente. AVANGARD ha proporcionado infraestructura (compactadoras, trituradoras), capacitación y empleo (con prestaciones) a algunos agremiados.

Los pepenadores del relleno sanitario laboraban bajo condiciones altamente peligrosas con el ir y venir de los camiones, además de los peligros de las condiciones climáticas, sobre todo con los rayos del sol, el polvo, los gases que se producen entre otros. Debido a que los pepenadores del relleno sanitario eran independientes, no contaban con ningún tipo de seguro médico.

Por su parte, los pepenadores de la planta de selección acordaron con su líder, Javier Téllez, adquirir la oportunidad de sacar de Bordo Poniente los materiales que no eran comercializados a cambio de su servicio médico, por lo que el único costo que cubría el líder era el traslado al hospital en caso de accidente. No existían las indemnizaciones ni las incapacidades, en el caso de los pepenadores de la planta de selección, dependiendo del acuerdo al que se llegaba entre los pepenadores de cada turno, se le otorgaba a la persona todo el salario semanal o bien una parte proporcional de él.

Esa era la situación hasta antes de mediados del 2011, situación que con seguridad cambió al ya no llegar la mayor parte de materiales reciclables a Bordo Poniente, como resultado de la separación de RSU. Y en cuanto se cerró Bordo Poniente, se puede tener la certeza de que la mayoría de toda esta gente ha quedado desempleada o al menos ya no vive de los RSU del D.F.

7.5 Descripción del manejo de los RSU en el D.F. hasta mediados del año 2011.

Para comprender el manejo de los RSU y profundizar en el problema y solución de tratamiento y disposición de los mismos, es necesario hacer una breve reseña de lo que implica cada una de las etapas de gestión de RSU en el D.F.

7.5.1 Generación en fuente

Como se había mencionado anteriormente, el D.F. es la segunda entidad más poblada de México, con 8,851,080 según el reporte 2010 (INEGI, 2010), una generación promedio por habitante estimada de 1.49 kg/hab/día¹¹ y una generación diaria de aproximadamente 12,500 t/d.

De acuerdo a lo reportado en el Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos del D.F. 2010, de los RSU generados en el D.F., el 55.58% (6,948 t/d) era materia orgánica, el 20.30% (2,538 t/d) eran materiales reciclables y un 24.12% corresponde a otros materiales (GDF, 2010).

A mediados del 2011, se empezó a implementar un programa de separación en fuente que impulsaba la recolección separada de RSU. Se entregaron trípticos y posters principalmente en las delegaciones de la ciudad en los que se explicaba básicamente cuál era la composición de los RSU del D.F., además se presentaban imágenes de los diferentes tipos de RSU a separar, como se puede observar en la del tríptico utilizado por la Secretaría de Obras y Servicios:

¹¹ Estimación propia para el año 2011 con base en las referencias (CONAPO, 2009), (SMA, 2008) e (INEGI, 2010).



Figura 7-1 Tríptico de separación de RSU en el D.F., Secretaría de Obras y Servicios, 2011

De acuerdo a la información difundida por la Secretaría de Obras y Servicios (SOS) a través de este tríptico, se puede observar que se manejó el concepto de residuos orgánicos como si fuera equivalente solo a los restos de comida y restos de flora o fauna. Por otro lado, dentro de los inorgánicos se encuentran clasificados materiales como los plásticos, papel y cartón, los cuales también son de origen orgánico, sin embargo, lo que la SOS trató de transmitir es que estos residuos se separan por ser susceptibles de ser reciclados.

Por ahora no se ha profundizado demasiado en una mejor y más meticulosa clasificación de los RSU debido a la complejidad de explicarla y llevarla a cabo, lo que se intentó en principio fue familiarizar a los ciudadanos con una separación sencilla de materiales reciclables, residuos orgánicos, residuos sanitarios y residuos de manejo especial. Sin embargo, este primer paso representó un gran reto por vencer en una ciudad en la que no se diferenciaba ni siquiera entre residuos orgánicos¹² e inorgánicos¹³ y en la que la diferencia entre los conceptos de material reciclable¹⁴, reutilizable¹⁵ y desechable¹⁶ es a criterio de muchos, sólo una cuestión económica o de practicidad, dejando de lado el impacto ambiental.

12 Estrictamente hablando, los residuos orgánicos son aquellos que contienen moléculas o derivados del carbono, también se pueden encontrar moléculas de oxígeno, nitrógeno, fósforo u otros elementos. Los residuos orgánicos a su vez se dividen en naturales y sintéticos (fabricados por el hombre).

13 Los residuos inorgánicos no contienen moléculas o derivados del carbono.

14 Material reciclable es aquel que se puede someter a un proceso para ser convertido en un material utilizable nuevamente.

15 Material reutilizable es aquel que se puede volver a utilizar sin necesidad de ser sometido a un proceso de transformación.

16 Material desechable es aquel que se utiliza por lo general una sola vez y se desecha.

7.5.2 Recolección

La recolección ha sido por muchos años, uno de los problemas más difíciles de controlar y que merman más el éxito de programas de separación y aprovechamiento de RSU en el D.F.

La recolección y transporte de los RSU del D.F. son responsabilidad de cada una de las 16 delegaciones políticas del D.F. La recolección en la mayoría de las colonias del D.F. se llevan a cabo por parada fija¹⁷, recibiendo los recolectores, una propina por llevarse los residuos. En algunas colonias, por lo general zonas de mayores recursos económicos, se colocan contenedores en las aceras, los cuales son vaciados diariamente por el servicio de limpia y recolección sin recibir ninguna propina por parte de los generadores.

El inventario de RSU del D.F. publicado más recientemente es el correspondiente al año 2008, en el cual se reporta que la SOS contaba con 2,485 camiones recolectores, de los cuales sólo un 7% contaban con dos compartimentos para recoger residuos orgánicos y residuos inorgánicos (SMA, 2008), lo cual no funcionó, ya que siempre se acumulaban más residuos de la llamada fracción inorgánica que de la orgánica y acababan mezclando todo en ambos compartimentos.

En ese mismo inventario se puede observar que de las más de 12,500 t/d generadas, sólo se están recolectando 10,853 t/d, es decir, que la eficiencia del servicio de recolección es del 87%. Esto junto con la falta de educación y cultura de la gente, explica la existencia de tiraderos clandestinos y de residuos tirados en vías públicas, coladeras y cuerpos de agua.

Actualmente, como parte del programa de separación que se puso en marcha el 03 de Marzo de 2011, denominado: “Vamos a separar, para respirar mejor”, se inició la recolección separada por días en el D.F., es decir, los martes, jueves y sábados se recogen residuos orgánicos¹⁸ y los lunes, miércoles, viernes y domingos se recogen los residuos inorgánicos¹⁹, residuos sanitarios y residuos de manejo especial (SOS, 2011). Cabe mencionar que para el lanzamiento de este programa, se le ofreció al sindicato de trabajadores del GDF, un estímulo económico de 50 pesos por tonelada de residuos orgánicos bien separados que ingresaran a Bordo Poniente (Pantoja, El Universal, 2011).

7.5.3 Transferencia

En la etapa de transferencia, los RSU toman diferentes caminos, algunos eran dirigidos hacia las plantas de selección, otros a las plantas de compostaje y otros iban directamente al relleno sanitario de Bordo Poniente (antes de su cierre).

La función de una estación de transferencia (ET) es la de mejorar la eficiencia del servicio de recolección. Esto se logra acopiando los residuos de las colonias de cada ET y llevándolos de ahí hasta su destino en camiones más grandes, llamados transfers (capacidad de 80 m³), lo cual reduce el número de viajes que se tendrían que hacer con los camiones de recolección domiciliaria, el tiempo de traslado y el consumo de combustible.

17 En la recolección de parada fija, el propietario de los residuos es el responsable de llevar sus residuos hasta el camión recolector, el cual hace paradas en puntos preestablecidos de recolección.

18 En el programa “Vamos a separar para respirar mejor” los residuos orgánicos corresponden a desperdicios alimenticios, cáscaras, carne, sobras de frutas y verduras, así como hojarasca, residuos de poda, etc.

19 En el programa “Vamos a separar para respirar mejor” los residuos inorgánicos corresponden a vidrio, plástico, papel, madera y cartón.

En el D.F. existen 13 ET, las cuales se ubican en sólo 12 delegaciones políticas bajo un radio de influencia de 7 km cada una. La operación y mantenimiento de cada ET es responsabilidad de la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) y en algunos casos, dicha responsabilidad se comparte con la delegación en la que se localiza la ET.

En la Tabla 7-1 se muestra el nombre de cada ET, su ubicación y las delegaciones de las que recibía residuos diariamente, hasta antes del cierre de Bordo Poniente.

Tabla 7-1 Estaciones de transferencia del Distrito Federal

Número	Estación de transferencia	Ubicación	Delegaciones a las que brinda servicio	Recepción estimada de RSU (t/d)
ET1	Gustavo A. Madero	Avenida 608 y Avenida 412 s/n, Col. San Juan de Aragón	Gustavo A. Madero	807.3
ET2	Azcapotzalco	Calle 4 s/n y Prolongación Naranja, Col. Ampliación del Gas	Azcapotzalco Gustavo A. Madero Miguel Hidalgo	1288.9
ET3	Venustiano Carranza	Calle Agustín Lara esquina Joaquín Pardavé, Col. Magdalena Mixhuca	Venustiano Carranza Iztapalapa Cauhtémoc	709.5
ET4	Cauhtémoc	Eje 3 Sur esquina Eje 1 Oriente s/n, Col. Ampliación Asturias	Cauhtémoc Iztapalapa Venustiano Carranza Benito Juárez	889.9
ET5	Miguel Hidalgo	Calle 11, entre Avenida Tecamachalco y Sierra Santa Rosa s/n, Col. Reforma Social	Miguel Hidalgo	625.7
ET6	Benito Juárez	Callejón Santísima y Prolongación Yácatas s/n, Col. Santa Cruz Atoyac	Benito Juárez	ND ²⁰
ET7	Álvaro Obregón	Prolongación Eje 5 Sur San Antonio No. 424, Col. Carola	Álvaro Obregón Benito Juárez Cuajimalpa Magdalena Contreras Miguel Hidalgo	1180.4
ET8	Coyoacán	Calzada de Tlalpan No. 3330 esquina Viaducto Tlalpan, Col. Santa Úrsula Coapa	Coyoacán Álvaro Obregón Benito Juárez Tlalpan Xochimilco	1535.5
ET9	Iztapalapa I	Prolongación Eje 5 Sur No. 7 a un costado de Zona Chinampería Santa Rosa, Central de Abasto	Iztapalapa	1251.2
ET10	Iztapalapa II	Prolongación Eje 5 Sur No. 7 a un costado de Zona Chinampería Santa Rosa, Central de Abasto	Iztacalco Central de Abasto	1291.1
ET11	Xochimilco	Francisco I. Madero No. 9977 antigua carretera Xochimilco Tulyehualco	Xochimilco Milpa Alta Tláhuac	468.6
ET12	Tlalpan	Carretera Picacho-Ajusco km 5.5, Col. Belvedere	Tlalpan Magdalena Contreras	543.5
ET13	Milpa Alta	Guanajuato Oriente casi esquina Quintana Roo s/n, Col. Barrio la Concepción	Milpa Alta	76.7

²⁰ No se reportaron datos mensuales durante el 2008.

Fuente: Elaboración propia a partir de visitas a las diferentes ET y de lo reportado por SMA (2008)

La ubicación y visita a cada una de las ET fue muy importante para medir distancias, saber qué tipo y cantidad de RSU se podía obtener de cada una de ellas. Así como analizar la relación de cada una de ellas con las plantas de selección en funcionamiento.

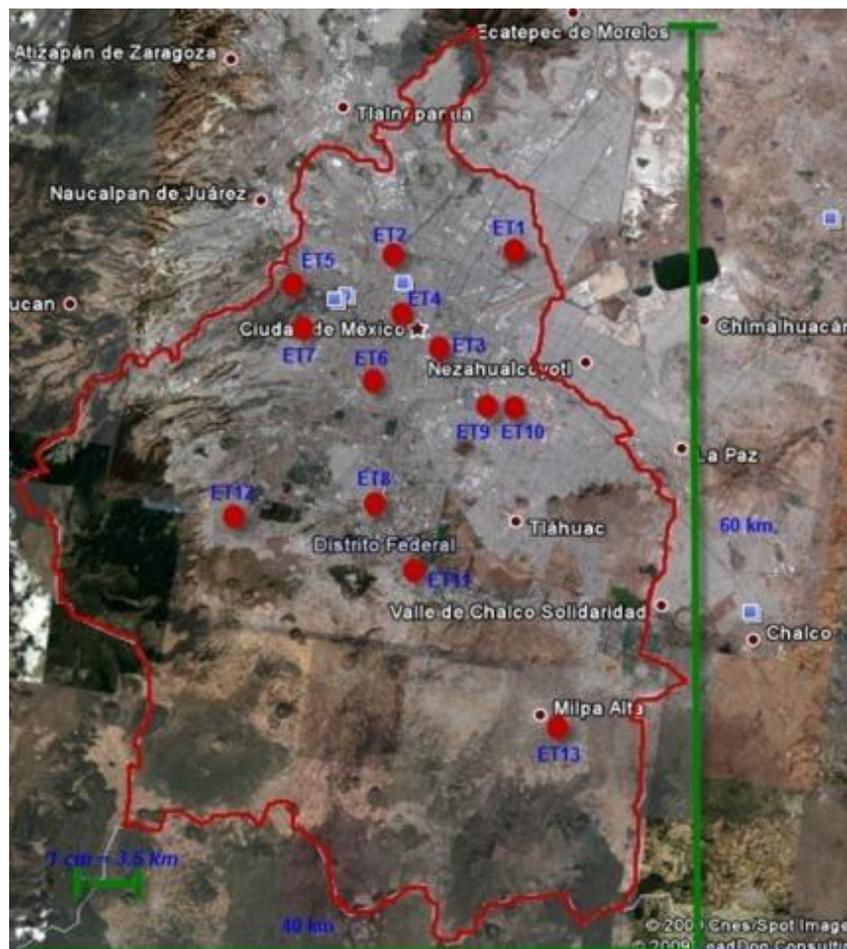


Figura 7-2. Ubicación de las estaciones de transferencia del D.F.

Fuente: (Cabrera , 2010)

En el 2008 se recibieron en total 10,853 t/d de RSU en las ET, se estima que en el 2009 se recibieron 10,927 t/d de RSU y se cuenta con 238 transfers que son propiedad de empresas privadas contratadas por la DGSU (SMA, 2008). Para el año 2011 no se cuenta con datos actualizados.

7.5.4 Selección y/o tratamiento de RSU.

La selección (también llamada recuperación) de materiales reciclables²¹, así como el tratamiento (generalmente para aprovechamiento) de los RSU se realiza a fracciones muy pequeñas de los RSU que en realidad se producen diariamente.

21 En el Distrito Federal los materiales reciclables que se busca recuperar principalmente son: metales, aluminio, PET (polietilentereftalato), polietileno de alta y baja densidad, cartón, papel, madera y tetrapack.

La selección de materiales reciclables que se encuentran en los RSU del D.F., se lleva a cabo en dos etapas: a) la preselección y b) la recuperación en plantas de selección.

- a) La preselección es la recuperación de materiales reciclables que realizan los choferes, sus ayudantes y voluntarios durante la etapa de recolección de residuos. Es una actividad que, si bien, no está considerada como legal en la gestión de los RSU del D.F., últimamente se fomenta por parte de las autoridades, quienes buscan que lleguen a disposición final la menor cantidad posible de RSU.
- b) La recuperación en plantas de selección, en el D.F. se refiere a la actividad manual de seleccionar y clasificar materiales reciclables de los RSU mezclados²². Para esta actividad se cuenta con la ayuda de bandas de separación que ayudan a disgregar un poco los residuos.

A continuación se explica de forma más amplia lo que implica la selección de RSU en la gestión actual de residuos del D.F.

En la actualidad, la DGSU cuenta con tres plantas de selección de materiales reciclables, a las que ha llamado "Plantas de Selección y Aprovechamiento de Residuos Sólidos". Las tres se encuentran a lo largo del borde oriental del D.F. y sus características se muestran en la Tabla 7-2.

22 En el Distrito Federal, los RSU llegan totalmente mezclados a las plantas de selección, lo cual hace más difícil la recuperación de los materiales potencialmente reciclables, además, muchos de ellos ya no se recuperan debido a la suciedad con la que llegan, considerándose de baja calidad por los compradores de dichos materiales.

Tabla 7-2. Características principales de las tres plantas de selección del Distrito Federal

Aspecto \ Sitio	Bordo Poniente	San Juan de Aragón	Santa Catarina
Establecimiento	Julio de 1994	Julio de 1994	Marzo de 1996
Área del sitio	9,500 m ²	8,000 m ²	5,600 m ²
Duración	15 años	15 años	15 años
Sistema de pesaje	Básculas	Básculas	Número de vehículos (no hay básculas)
Capacidad	2,000 ton/día	2,000 ton/día	2,500 ton/día
Número de bandas de selección	4 líneas	4 líneas	5 líneas
Capacidad por banda	500 toneladas por día	500 toneladas por día	500 toneladas por día
Longitud de banda	50 m	50 m	55 m
Horas de trabajo	20 horas en 3 turnos lunes a viernes	24 horas en 3 turnos lunes a sábado	24 horas en 3 turnos lunes a viernes
Número de trabajadores	400 personas	500 personas	400 personas
Organización laboral	“Frente Único de Pепенadores A.C.”	“Asociación de Selectores de Desechos Sólidos de la Metrópoli A.C.”	“Unión de Pепенadores del Distrito Federal Rafael Gutiérrez Moreno A.C.”
Trabajadores para selección	42 personas por línea	50 personas por línea	70 personas por línea
Materiales recuperados	Papel, plástico, vidrio, lámina de acero, aluminio, cobre, hierro, tortilla, ropa, llantas, hojalata.	Papel, plástico, vidrio, lámina de acero, aluminio, cobre, hierro, tortilla, ropa, llantas, hojalata y colchones.	Papel, plástico, vidrio, lámina de acero, aluminio, cobre, hierro, tortilla, ropa, llantas, hojalata y colchones.

Fuente: Adaptado de Mora (2004) y UNAM (2009)

Como se puede observar, en conjunto las tres plantas de selección tienen una capacidad instalada de 6,500 t/d. Hasta el año 2010 solo recibían un total de 4,113 t/d aproximadamente, es decir, sólo se utilizaba un 66% de la capacidad total. Aunado a esto, de los RSU que se recibían diariamente, sólo se recuperaban un 6.5% en promedio. Cabe mencionar, que la vida útil de la planta de Bordo Poniente y la de San Juan de Aragón se alcanzó en el 2009 y hasta finales del 2011 seguían operando sin ningún tipo de inversión en nuevos equipos o mantenimiento correctivo.

En la Tabla 7-3 se puede observar que San Juan de Aragón presenta el mayor porcentaje de recuperación, en tanto que Bordo Poniente el menor.

Tabla 7-3. Plantas de selección: Ingreso, recuperación y egreso

Planta de selección	Ingreso (t/d)	Recuperación (t/d)	Egreso (t/d)	% recuperado
Planta de selección Bordo Poniente	1399.6	77.4	1322.2	5.5
Planta de selección San Juan de Aragón	1393.9	112.4	1281.5	8.1
Planta de selección Santa Catarina	1319.2	77.5	1241.7	5.9
Total	4112.7	267.389	3845.323288	6.5

Fuente: Elaboración propia a partir de UNAM (2009) y SMA (2008)

Como se puede observar en la Figura 7-3, dos de las plantas de selección se ubican fuera del Distrito Federal y sólo una dentro del territorio, lo cual explica que solo un 46.5% de los residuos que ingresan a dichas plantas provengan de las ET del D.F. y el resto provengan de la recolección y de particulares del Estado de México (GDF, 2010).



Figura 7-3 Ubicación de las plantas de selección del D.F.

Fuente: Adaptado de Cabrera (2010)

Se estima que para el año 2009 el ingreso de residuos a las plantas de selección no aumentó en forma considerable, ya que de acuerdo a la logística de operación actual de manejo de los residuos en el D.F. el ingreso a las plantas no está definido por el aumento en la cantidad de residuos generados, sino a la demanda solicitada por las plantas de selección.

En cuanto a la venta de los materiales que se recuperan en las plantas de selección, cabe mencionar que la concesión de empresas privadas que compran la mayoría de los materiales recuperados ha permitido que se introduzca en las plantas, maquinaria propiedad de dichas empresas y que se abran nuevas fuentes de trabajo. Las empresas con mayor presencia actualmente son ECOCE y AVANGARD.

En lo que respecta al tratamiento de RSU en el D.F., el único tratamiento que se le da a los residuos es el de compostaje de la fracción orgánica, la cual se realiza en alguna de las 9 plantas de composta con que cuenta el D.F. en las que se procesa esta fracción para su aprovechamiento y generando mejorador de suelos de terrenos agrícolas, áreas verdes, viveros, parques, camellones y glorietas. La planta de compostaje más grande es la de Bordo Poniente, la cual amplió su capacidad en Junio de 2011 hasta 1,200 t/d (López, 2011) y se pretendía que alcanzara las 3,000 t/d a finales del 2011, dato que no ha sido confirmado oficialmente.

7.5.5 Disposición Final

La DGSU del Distrito Federal, es la instancia responsable del manejo y operación del relleno sanitario Bordo Poniente, el único sitio de disposición final con el que contaba el D.F. hasta el 19 de diciembre del 2011, aunque el sitio se encuentre ubicado al suroeste del antiguo lago de Texcoco en el municipio de Netzahualcóyotl, Estado de México.

Para la operación del Bordo Poniente éste se dividió en cuatro etapas, de las cuales las tres primeras, operadas a partir de 1985 y hasta 1994. A principios de 1995 inició la operación de la IV y última etapa del relleno sanitario para la disposición final de los residuos sólidos y de manejo especial. Esta etapa tiene una superficie de 375 Ha, haciéndose un total de 721 Ha utilizadas contando las cuatro etapas.

La cantidad de RSU recibidos en el 2010 ascendía aproximadamente a 13,401 t/d, provenientes del D.F. (75%) y del Estado de México (25%), otros tipos de residuos que se recibían eran los de la construcción, éstos provenían de particulares y de las actividades que realizaba la DGSU, pero por ser considerados de manejo especial y no RSU no forman parte de este estudio.

La mayor parte de los RSU recibidos en el relleno sanitario provenían de las estaciones de transferencia. El ingreso diario aumentaba cada año, por ejemplo, aumentó en un 10.5 % del año 2006 a 2008 pasando de 11,990 a 13,401 toneladas, por lo que en cuanto se actualicen los datos al año 2012 sin duda, habrá un incremento.

En las celdas IV, V, VI, VII y VIII ya no se permitía el tiro de residuos sólidos desde antes del 2010, ya que se encontraban a su máxima capacidad y se estaban preparando para ser clausuradas.

Respecto a las celdas II y III, son las que se encontraban operando hasta el cierre de Bordo, teniendo dos frentes de tiro. El frente de tiro A se localiza en los límites de la celda III con 100 m de longitud y el frente B se encuentra sobre la celda II con 100 m de longitud, la disposición final avanzaba hacia la celda I, ver Figura 7-4.

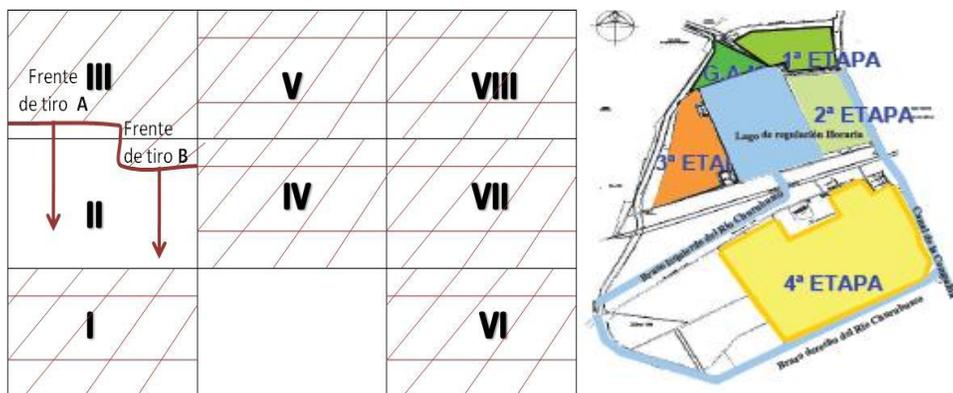


Figura 7-4. Frente de tiro A y B del relleno sanitario Bordo Poniente Etapa IV.

Fuente: (GDF, 2009)



Figura 7-5. Distribución de Bordo Poniente

Fuente: (Cabrera, 2009)

La celda I, al ser una de las más antiguas y a consecuencia de la degradación de los residuos ha tenido asentamiento, lo que ha originado una disminución del volumen, modificando los taludes, lo que permitió que nuevamente se depositaran residuos.

Para la operación del relleno sanitario, se tenían contratados dos prestadores de servicio (uno en cada frente de tiro), que se encargaban del acomodo, compactación y cobertura diaria de los residuos sólidos con sus propios equipos y personal.

Los horarios de atención del relleno sanitario eran de 24 horas los 365 días del año. Se estima que diariamente se recibían aproximadamente 600 cajas provenientes de las estaciones de transferencia, rechazo de las plantas de selección y de la planta de composta.

La Etapa IV del relleno sanitario de Bordo Poniente se seguía usando debido a la ausencia de un nuevo lugar de disposición RSU, sin embargo, el 22 de Noviembre de 2010 se firmó un convenio de clausura, en el que se estableció que el relleno dejaría de dar servicio el 31 de Diciembre de 2011 (CNA, 2010). Durante el 2011 se pretendió que con el programa de separación: “Vamos a separar para respirar mejor” lanzado en el mes de Marzo de 2011 junto con la ampliación de la capacidad de la planta de compostaje, se lograra reducir la disposición de RSU de 13,401 t/d hasta 7,500 t/d (Ramos, 2011). Sin embargo, el cierre del relleno sanitario llegó el 19 de diciembre de 2011 y sin planeación alguna, se dejaron de recibir RSU. Este suceso ha suscitado la formación de tiraderos clandestinos en la capital de nuestro país y aunque el GDF está negociando la disposición de RSU en rellenos sanitarios del Estado de México, urgen alternativas propias de reducción de generación, tratamiento y disposición de RSU del D.F.

8 RESULTADOS DEL ESTUDIO A NIVEL PREFACTIBILIDAD

El resultado de este segundo nivel de estudio es un documento de análisis completo que describe los siguientes puntos:

1. Caracterización de la zona de estudio.
2. Antecedentes de la selección de las tecnologías a evaluar.
3. Marco teórico de las tecnologías seleccionadas: digestión anaerobia y gasificación.
4. Experiencia operacional que respalda la propuesta de digestión anaerobia y gasificación de RSU.
5. La Postura del GDF con respecto a tecnologías como la gasificación y la digestión anaerobia.
6. Dimensionamiento de la propuesta.
7. Aspectos ambientales del uso de digestión anaerobia y gasificación de residuos con generación de energía.
8. Marco legal.
9. Evaluación social.
10. Evaluación económica del proyecto.

A continuación se detallan todos los hallazgos y resultados obtenidos durante el desarrollo de cada uno de los puntos que incluye el “Estudio de Prefactibilidad para la Implementación de un Sistema de Aprovechamiento de RSU con generación de energía eléctrica para el Distrito Federal”.

8.1 Caracterización de la zona de estudio

La identificación de la zona de estudio se realizó en el estudio a nivel perfil, sin embargo, a nivel prefactibilidad se realizó la caracterización de la zona de estudio, es decir, las características y cantidad de sus RSU del D.F., porcentajes de separación, descripción de la infraestructura existente actualmente, personal y costos.

Para cumplir con este punto, fue necesario actualizar la caracterización de los RSU del D.F., por lo que se realizó un muestreo puntual en cada una de las 13 estaciones de transferencia²³ del D.F. Los resultados se reportaron en el estudio de Garcés (2010), dicho trabajo se puede consultar si se desea conocer más ampliamente la metodología utilizada (Garcés, 2010).

El muestreo se llevó a cabo siguiendo las especificaciones que marca la normativa mexicana al respecto, si bien, no existen para ello normas oficiales, si hay normas técnicas²⁴ para:

- Determinación de la generación
- Método de Cuarteo

23 Se muestrearon las 13 ET con las que cuenta el D.F. debido a que el flujo de RSU que de ellas sale, es el que se va a disposición final a relleno sanitario. El relleno sanitario no se consideró buena opción para muestrear debido a la presencia de pepenadores, la manipulación de muchos vehículos de carga pesada y la exposición a condiciones adversas de clima. Además, en el muestreo se pudo observar qué tipo de residuos llegan a cada ET, lo cual ayudó a determinar las fuentes potenciales de RSU que se describen más adelante.

24La identificación completa de las normas utilizadas se puede encontrar en el apartado de revisión de normatividad aplicable.

- Determinación de peso volumétrico
- Selección y cuantificación de subproductos
- Preparación de muestras en laboratorio para su análisis

Los resultados de este muestreo que fueron considerados para el análisis más detallado de las tecnologías se presentan en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1 Determinación de subproductos de los RSU del D.F., 2010

Material	Álvaro Obregón	Azcapotzalco	Benito Juárez	Coyoacán	Cuauhtémoc	G.A.M.	Iztapalapa I	Iztapalapa II	Miguel Hidalgo	Milpa alta	Tlalpan	Venustiano Carranza	Xochimilco	Promedio ponderado
Cartón	3.84	3.28	5.95	3.03	2.93	3	1.27	1.57	2.26	5.55	5.64	2.82	2.75	2.93
Cuero	0	0	0	0	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
Hueso animal	0.34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04
Latas de aluminio	0.15	0.13	0.25	0.42	0.09	0.22	0.3	0.08	0.47	0	0	0	0.15	0.2
Cerámica	0.51	1.12	0	1.71	0	0.39	0.08	0.78	0	5.49	0	1.55	0.96	0.72
Madera	1.09	1.14	0.34	0.37	0.5	0.19	0.28	0.2	0.14	0.7	0.38	0	0.08	0.45
Material de construcción	0.46	4.69	0	0	0	0.46	3.55	4.53	4.47	0	0	0.77	0	1.87
Residuos electrónicos	0	0	0	0	0.01	0.09	0	0	1.04	0	0	0	0	0.06
Metales ferrosos	0	0.94	1.49	1.67	0.75	2.36	0.83	1.66	1.07	0.8	1.1	1.09	1.37	1.16
Metales no ferrosos	1.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13
Pañales y toallas sanitarias	5.56	3.15	9.5	4.08	1.94	6.37	5.86	1.92	4.78	16	9.11	6.69	9.57	5.05
Papel aluminio	0.16	0.24	0	0	0.19	0	0	0	0	0.09	0	0.43	0	0.09
Papel de impresión	1.09	3.44	2.05	1.47	4.45	1.16	0.93	0.95	1.39	1.01	0.65	1.1	2.68	1.76
Papel de revista	1.2	0.43	0.98	1.34	0.49	0.26	0.61	0.23	1.34	2.28	0	1.97	0.46	0.79
Papel encerado	0	0	0.89	1.24	0.09	0	0	1.42	1.16	1.32	0	0	0	0.44
Papel sanitario	5.77	6.59	0.89	1.7	9.58	8.46	4.94	5.11	5.62	6.84	6.94	7.29	7.57	5.72
Otros papeles	0.84	1.53	1.32	0	2.64	1.08	1.88	0	1.33	0	0	1.35	1.81	1.08
Periódico	1.34	1.67	2.97	1.34	2.47	2.93	1.64	1.65	1.06	0.85	3.15	1.53	1.87	1.82
Plástico N-1 (PET) ²⁵	1.11	1.6	2.15	0.89	1.51	0.75	0.63	0.2	2.38	1.7	3.22	1.47	1.06	1.21
Plástico N-2 (PEAD) ²⁶	0.44	1.7	1.54	0.84	0.78	0.58	1.24	1.1	2.01	1.97	1.91	2.35	0.91	1.2

25 PET son las siglas de Polietilentereftalato e incluye botellas de refresco, de agua, recipientes de alimentos y limpiadores, etc.

26 PEAD son las siglas de Polietileno de alta densidad e incluye botellas de leche, de detergente, de productos cosméticos bolsas rígidas, etc.

Tabla 8-1 Determinación de subproductos de los RSU del D.F., 2010 (Continúa)

Material	Álvaro Obregón	Azcapotzalco	Benito Juárez	Coyoacán	Cuauhtémoc	G.A.M.	Iztapalapa I	Iztapalapa II	Miguel Hidalgo	Milpa alta	Tlalpan	Venustiano Carranza	Xochimilco	Promedio ponderado
Plástico N-3 (PVC) ²⁷	0.17	0.32	0.21	0.38	0.17	0.11	0	0.02	0.06	0.46	0.18	0.25	0.04	0.17
Plástico N-4 (PEBD) ²⁸	0.28	0.35	0.55	0.61	0.27	0.99	0.25	0.5	0.25	0.6	0.28	0.61	0.19	0.43
Plástico N-5 (PP) ²⁹	0.59	0.47	0.87	1.76	0.92	0.64	0.53	0.43	0.57	0.67	1.28	1.31	0.91	0.84
Plástico N-6 (PS) ³⁰	0.45	0.37	0.68	0.79	0.52	0.4	0.44	0.51	0.64	0.73	1.27	0.83	0.58	0.58
Plástico N-7 (Otros plásticos) ³¹	1.19	1.05	0.33	1.12	0.45	1.01	0.24	0.81	0.47	0.78	0.7	1.59	1.03	0.85
Bolsas de Plástico	8.29	8.1	6.09	8.37	8.13	6.61	2.79	4.44	4.56	6.07	6.46	6.13	7.3	6.46
Residuos finos	0.29	0.07	3.22	0.38	0.17	1.01	0.2	0.86	2.72	0.85	2.93	0.57	0.97	0.8
Residuos orgánicos (alimentos y jardín)	41.87	45.09	41.98	48.5	46.58	45.7	62.73	63.8	50.2	35.4	39.9	47	41.57	49.5
Tetra pack	0.59	2.13	1.2	1.13	1.48	0.75	0.43	0.65	0.98	1.21	1.67	1.21	1.86	1.1
Trapo	9.38	0.66	5.99	3.06	3.44	5.6	0.91	2.65	2.42	3.3	2.34	3.97	6.45	3.64
Unicel Poliuretano expandido	8.41	0.58	0.96	0.67	0.77	0.86	0.61	0.4	0.52	0.37	0.46	0	0.61	1.42
Vidrio de color	0.74	0	0.34	1.09	1.15	0	0.35	0.42	0.81	0	4.17	0.9	0.15	0.72
Vidrio transparente	1.31	4.17	0.8	0.98	2.22	2.92	0.92	1.56	2.17	2.05	1.91	2.01	2.5	1.93
Zapatos	0	0	0	0	0	0	0.72	0	1.63	0.62	0.79	2.11	0	0.35
Residuos de manejo especial*	0.61	4.01	0.82	0.98	1.52	2.06	0.04	0.65	0.31	0.93	1.19	0.94	3.96	1.35
Residuos peligrosos**	0	0.1	0.26	0.35	0.1	0.33	0.25	0.46	0	0.09	0.04	0	0	0.19
Otros***	0.71	0.89	5.41	9.73	3.41	2.71	4.55	0.5	1.12	1.28	2.28	0.21	0.63	2.94
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

* Los residuos de manejo especial incluyen medicamentos, pilas y llantas.

** Los residuos peligrosos incluyen sólidos o líquidos tóxicos o biológico infecciosos (jeringas, sangre, etc).

***Dentro de otros, se colocó a aquellos residuos que no se pudieron identificar o reconocer como parte de las demás clasificaciones.

27 PVC son las siglas de Policloruro de vinilo e incluye charolas y contenedores de alimentos, tuberías, revestimientos eléctricos, partes de zapatos, etc.

28 PEBD son las siglas de Polietileno de baja densidad e incluye bolsas, cubiertas plásticas delgadas, tubos flexibles, etc.

29 PP son las siglas de Polipropileno e incluye cajas, contenedores, maletas, tapas, envases rígidos, electrodomésticos, etc.

30 PS son las siglas de Poliestireno e incluye vasos, platos, contenedores y soportes de unicel.

31 Otros plásticos son los que no pertenecen a ninguno de los plásticos previamente clasificados, e incluyen garrafones de agua, contenedores rígidos, empaques de golosinas, etc.

8.1.1 Cantidad de RSU separados en fuente (porcentaje de fracción orgánica, inorgánica y mezcla).

En el año 2008, se reportó en el Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal que la recolección de residuos orgánicos separados en origen ascendía a 199,889 t/año, es decir, aproximadamente 104 t/d (SMA, 2008).

En el año 2009 no se reportó algún dato al respecto de forma oficial, sin embargo, en ese mismo año se realizó el muestreo de las 13 ET del D.F. para fines de este estudio, donde se observó que las únicas ET a las que llegaban RSU orgánicos separados eran: Venustiano Carranza, Miguel Hidalgo, Benito Juárez, Iztapalapa II, Xochimilco e Iztapalapa I (UNAM, 2009).

En el año 2010, se visitó la planta de composta de Bordo Poniente con motivo de conocer el nuevo funcionamiento debido a la ampliación de la capacidad instalada de la misma. En ese entonces se estaban recibiendo alrededor de 250 t/d de RSU separados en el origen; la capacidad de la planta ya era de 500 t/d con la expectativa de ampliarla a 2,000 t/d (López, 2010).

En el 2011, si bien, no se ha reportado nada de forma oficial, se ha anunciado y comprobado mediante visitas de campo que debido a la entrada en vigor del programa “Vamos a separar para respirar mejor”, se logró recolectar hasta 589 t/d (Pantoja, 2011) en el mes de Marzo y que en entre los meses de Abril a Junio se alcanzaron hasta 1,200 t/d (Ramos, 2011), las cuales se enviaron a la planta de compostaje de Bordo Poniente.

Ahora bien, todos los datos anteriores se refieren sólo a residuos orgánicos domiciliarios separados, pero también existen otras fuentes importantes de este tipo de residuos orgánicos que se producen en mayor cantidad diaria y los cuales se concentran en los mercados más grandes de la Ciudad de México como se observa en la Tabla 8-2:

Tabla 8-2. Tipos de residuos orgánicos por fuentes generadoras para el D.F.

Fuente generadora	% de residuos alimenticios	% de residuos de jardinería
Unifamiliares y plurifamiliares	34.66	5.12
Establecimientos comerciales	38.73	0.15
Mercados	63.08	0.05
Restaurantes y bares	74.43	0.08
Centros de espectáculos y recreación	16.17	0.42
Servicios públicos	5.71	0.59
Hoteles	43.23	3.66
Oficinas públicas	21.22	0.30
Centros educativos	16.02	6.32

Fuente: (FEMISCA, 2009)

La Central de Abasto (CEDA), el mercado más grande del D.F., hasta el año 2011, generaba entre 500 y 800 t/d, de las cuales, aproximadamente 500 toneladas (UNAM, 2009), diarias eran residuos orgánicos que actualmente se deben estar separando con la entrada en vigor del programa de separación del Distrito Federal a mediados del 2011.

Los residuos orgánicos de la CEDA alcanzan una pureza de hasta el 95%, esto de acuerdo a los estudios de caracterización realizados a la fracción orgánica que se obtenía los días martes y jueves hasta antes de que entrara en vigor el programa de separación del D.F.

Por otra parte, también existen dos estaciones de transferencia que son susceptibles de fungir como fuente de residuos orgánicos separados, como es el caso de Iztapalapa I y de Xochimilco, las cuales sin programa permanente de separación ya recibían aproximadamente hasta 467 toneladas (UNAM, 2009) por día respectivamente en días de recolección de residuos orgánicos (martes, jueves y sábado).

En la Tabla 8-3 se resumen las características de los residuos orgánicos que se manejaban hasta el 2011 en cada fuente antes mencionada, su cantidad y un estimado de lo que se puede estar obteniendo con el buen cumplimiento del programa de separación en fuente de forma permanente.

Tabla 8-3 Análisis de las mejores fuentes de residuos orgánicos separados en origen hasta el 2010

Fuentes potenciales de residuos orgánicos	Residuos recibidos	Residuos orgánicos separados	Pureza de los residuos orgánicos separados	Humedad de los residuos orgánicos	Estimación de residuos orgánicos separados en 2012**
Central de Abasto (CEDA)	600 – 800 t/d*	88 t/d	90-95%	86-92%	500 t/d
Estación de Transferencia Iztapalapa I (Iztacalco y Central de Abasto)	1,291 t/d	88 t/d	90-95%	85-90%	Mínimo 500 t/d
Estación de Transferencia Xochimilco	469 t/d	467 t/d en días de recolección orgánica y 113 en días de recolección inorgánica	98% en días de recolección orgánica	80-90%	No determinado

* En el caso de la Central de Abasto, no se recibían, sino que se generaban entre 600 – 800 t/d.

** El Potencial de generación de residuos orgánicos separados se refiere a la cantidad de residuos orgánicos que se generaban en cada fuente pero que hasta el 2010, se seguían mezclando con residuos inorgánicos.

Fuente: Elaboración propia a partir de López (2010), Sánchez (2010) y UNAM (2009).

Afortunadamente, a partir del mes de Julio del 2011 el Programa de Separación se empezó a aplicar en todas las colonias del Distrito Federal, sin embargo aún no se cuenta con un estudio de

caracterización que actualice estas nuevas condiciones de generación de residuos. Se sabe por medios informales que actualmente ya se separa buena parte de la generación doméstica de residuos orgánicos, pero habrá que hacer una nueva caracterización para conocer con exactitud las fracciones que se están separando en cada una de las fuentes generadoras de residuos orgánicos.

8.1.2 Descripción de la infraestructura y capacidad (t/d) con la que se cuenta actualmente para el tratamiento (aprovechamiento³² y/o valorización³³) de los RSU del D.F.

Como se ha dicho anteriormente, los RSU del D.F. son responsabilidad de la SOS, sin embargo, mucha gente depende de la recuperación y venta de los materiales reciclables y es por eso que los RSU son un tema controversial en el que se mueven muchos intereses en el sector público y privado.

Por parte del GDF, el único aprovechamiento que se lleva a cabo de los RSU es el compostaje de residuos orgánicos (residuos de poda, alimentos y granjas) para producción de mejoradores de suelo. Este producto actualmente no es valorizable, ya que actualmente se regala, sin embargo, es una forma de disminuir la cantidad de RSU que se envían a disposición final. Como se ha mencionado anteriormente, la planta de compostaje más grande es la de Bordo Poniente, recibiendo 1,200 t/d de residuos orgánicos separados en fuente y con expectativas de ampliación hasta alcanzar las 3,000 t/d de capacidad (López, 2011).

En los RSU que se generan en el D.F., se encuentran grandes cantidades de residuos valorizables, es decir, materiales por los que hay una demanda y por los que se ofrece una retribución económica; estos materiales son el cartón, el papel, el vidrio, el aluminio, varios metales y algunos plásticos.

El tratamiento o reciclaje de RSU valorizables (cartón, papel, vidrio, aluminio, varios metales y algunos plásticos) del D.F. no existe a nivel público, sólo a nivel privado, sector que también se ve limitado por cuestiones políticas y sociales que no le permiten el acceso a los RSU como materia prima. Un caso especial es el de la industria de reciclaje de plásticos, la cual importa a nivel nacional aproximadamente 10,000 t/d de plásticos de Estados Unidos y Guatemala debido a las limitaciones federales, estatales y locales de usar los RSU generados en México (Cruz, 2010).

Por otra parte, la mayoría de las empresas dedicadas al reciclaje de plásticos, papel, cartón, vidrio, etcétera, se localizan por muy cerca en el Estado de México. En el Distrito Federal, si bien, se pueden encontrar pequeños compradores de materiales reciclables, estos no se dedican al reciclaje como tal.

En el caso del tratamiento y aprovechamiento de los residuos orgánicos separados, en la Tabla 8-4 se muestran las características generales de las plantas de compostaje del GDF ubicadas en el

32 Un residuo es aprovechable si tiene características atractivas para alguien, sin embargo, eso no lo vuelve necesariamente valorizable.

33 Un residuo valorizable es aquel por el que alguien está dispuesto a pagar, es decir, que existe una demanda traducida en una remuneración económica.

Distrito Federal. En la tabla se incluye la cantidad de residuos ingresada, de composta producida y el porcentaje de conversión reportado para el año 2008 para la mayoría de las plantas (último dato actualizado oficialmente con el que se cuenta).

Es importante resaltar que los datos de la planta de Bordo Poniente fueron actualizados para el año 2010 y 2011 mediante visitas a la planta, entrevistas y seguimiento de las noticias de último momento. La planta a partir de Marzo del 2011 amplió su capacidad a 2,000 t/d y comenzó a recibir aproximadamente 1,146 t/d (Ramos, 2011) de residuos orgánicos, alcanzando en Abril-Junio del mismo año las 1,200 t/d (López, 2011).

Tabla 8-4 Características generales de las plantas de composta existentes

Planta de composta	Capacidad instalada (t/d)	Ingreso total (t/d)	Promedio de composta producida (t/d)	% de conversión	Tipo de proceso	Origen de los residuos	Ubicación
Bordo Poniente	2,000 ³⁴	1,200	500	25	Pilas aerobias	ETs CFE Privados DGSU CEDA (flores y hortalizas)	Autopista Peñón Texcoco km 2.5. Zona Federal de Texcoco.
Álvaro Obregón	5	5	4	77	Pilas aerobias	Recolección de los residuos de poda	Av. 5 de Mayo s/n. Colonia Lomas de Tarango.
Cuajimalpa	3	3	2	75	Pilas aerobias	Recolección de los residuos de poda	Avenida las Torres s/n. Colonia Lomas del Padre Cuajimalpa.
Iztapalapa	4	3	0.42	13	Pilas aerobias	Recolección de los residuos de poda	Interior del Panteón de San Lorenzo Tezonco. Av. Tláhuac s/n Pablo. San Lorenzo Tezonco
Milpa Alta (5 plantas)	4	4	1	25	Pilas aerobias	Recolección de los residuos de poda	Ejido San Francisco Tecoxpa, Ejido San Antonio Tecomitl, Pequeña Propiedad San Pedro Actopan y San Lorenzo Tlacoyucan.
Xochimilco	4	1	1	60	Pilas aerobias	Recolección de los residuos de poda, lodos activados,	Periférico Oriente casi esq. Canal de Chalco
Total	2,020	1,216	508.42	44			

Fuente: Elaboración propia a partir de SMA (2007) y UNAM (2009)

³⁴ Aunque aún no se reporta nada en documentos oficiales, gracias a las visitas de campo y entrevistas con el personal a cargo, hoy se sabe que apenas a finales de 2010 se había ampliado la capacidad de la planta a 500 t/d, pasando de 4 hectáreas a 15 hectáreas y su meta desde entonces era la de alcanzar las 2,000 t/d, las cuales aún no se alcanzan, pero se dice que desde que entró el vigor el programa "Vamos a separar para respirar mejor" se han alcanzado mínimo 1,146 t/d de residuos orgánicos que llegan a la planta de Bordo Poniente (Ramos, 2011).

Cabe mencionar que se planea instalar otra pequeña planta de composta en Tláhuac, con una superficie de 4 hectáreas (Ramos, 2011), por lo que se podrían tratar otras 200 t/d, siguiendo el mismo esquema con el que operaba la planta de Bordo Poniente cuando contaba con sólo 4 hectáreas.

Las plantas de compostaje apenas tratan, entre todas, 1,216 t/d. Si se considera que para una planta con capacidad para 200 t/d se requieren alrededor de 4 hectáreas, para tratar las 4,809 t/d aproximadas que quedan sin tratamiento, se requerirían unas 25 hectáreas más de terreno para su instalación.

8.1.3 Cobertura actual de los servicios de tratamiento de RSU en el D.F. (%).

De acuerdo a los estudios de generación de RSU reportados en el Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Distrito Federal, de los 12,646 t/d de RSU generados diariamente (GDF, 2010), sólo se trataban 1,216 t/d con compostaje en el 2011, lo que corresponde a un 17.3% de la generación total de residuos orgánicos.

De las 1,216 t/d que se someten a compostaje, sólo un 44% (511 t/d) se convierten en compost, el resto (651 t/d) se regresan al proceso de compostaje o se envía al relleno sanitario, por lo que del total de los residuos orgánicos generados (7,029 t/d), sólo se logra desviar un 7.3% del relleno sanitario o de compostaje por segunda vez.

8.1.4 Vida útil restante de la infraestructura existente (años).

Las plantas de compostaje no tienen una vida útil pre establecida, por su parte, la planta de Bordo Poniente que es la que tiene una capacidad instalada muy superior al resto, adquirió equipo nuevo en el año 2010 para ampliar su capacidad a 500 t/d, por lo que esos equipos le otorgan por lo menos una vida útil de unos 15 a 20 años a partir de ese año. En el 2011 se amplió la planta nuevamente por lo que se adquirieron aún más equipos para alcanzar la capacidad instalada de 2,000 t/d (López, 2010).

En el caso de las plantas de selección de Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina ya se ha alcanzado su vida útil, las dos primeras se instalaron y comenzaron operaciones en Julio de 1994 y la tercera hasta Marzo de 1996. La vida útil de las 3 plantas fue establecida como de 15 años, por lo que en Marzo del 2011 se cumplió dicho periodo para la última y más nueva de las 3, la de Santa Catarina. Aunque la vida útil se pudiera alargar si el estado de las plantas fuera buena, la realidad es que con el programa de separación de residuos del GDF, los materiales reciclables en buenas condiciones ya no llegan a las plantas de separación, por lo que no hay muchas esperanzas de que dichas instalaciones (cuya separación es principalmente manual) subsistan por mucho tiempo más.

8.1.5 Costos de operación y mantenimiento.

El Código Fiscal del Distrito Federal, en su artículo 243 muestra las tarifas para los diferentes servicios de recolección y recepción de residuos que presta el Gobierno del Distrito Federal y que deben pagar los generadores de volúmenes mayores a 50 kg/d. Dichas tarifas pueden servir como

referencia para hacer una estimación del costo por kilogramo que absorbe el GDF ofreciendo los servicios de recolección, transferencia, tratamiento y disposición de forma gratuita. Las tarifas del Código Fiscal del Distrito Federal, así como costos operativos obtenidos directamente de los servidores públicos a cargo de dichos servicios se encuentran en la Tabla 8-5.

Tabla 8-5 Costos de los servicios de recolección, transferencia, tratamiento y disposición final de RSU en el Distrito Federal.

Servicio	Costo (\$/kg)	Fuente
Recolección de residuos sólidos urbanos separados, excepto poda.	1.05	(GDF, 2011)
Recolección de residuos de poda.	1.92	(GDF, 2011)
Recolección de residuos de manejo especial, excepto construcción.	2.71	(GDF, 2011)
Recolección de residuos de construcción en vehículos registrados y autorizados.	0.52	(GDF, 2011)
Recepción en estaciones de transferencia de residuos sólidos urbanos separados excepto poda.	0.61	(GDF, 2011)
Recepción en estaciones de transferencia de residuos de poda.	1.21	(GDF, 2011)
Recepción en centros de compostaje registrados y autorizados, de residuos orgánicos y/o de poda.	1.22	(GDF, 2011)
Recepción de residuos mezclados en plantas de selección.	0.050	(JICA, 1999)
Recepción de residuos sólidos urbanos separados en sitios de disposición final.	0.26	(GDF, 2011)
Costo operativo aproximado de transportar residuos sólidos urbanos de la fuente generadora a estaciones de transferencia.	0.3	(Estrada, 2011)
Costo operativo aproximado de transportar residuos sólidos urbanos de las estaciones de transferencia a plantas de selección, plantas de compostaje o relleno sanitario.	0.086	(Estrada, 2011)
Costo operativo aproximado de disposición final de residuos sólidos urbanos en relleno sanitario.	0.058 – 0.068	(Licea, 2010), (Estrada, 2011)
Costo operativo aproximado de tratamiento de residuos orgánicos mediante compostaje.	0.050	(López, 2010)

Fuente: (JICA, 1999; Licea, 2010; López, 2010; Estrada, 2011; GDF, 2011).

8.2 Antecedentes de la selección de las tecnologías a evaluar.

Considerando como problema de más urgente atención, la carencia de un nuevo sitio de disposición final de los RSU del D.F. Desde años anteriores se han buscado alternativas tecnológicas que aprovecharan las características de dichos residuos, con las que se obtuvieran productos y subproductos valorizables y que al mismo tiempo redujeran el volumen de los RSU que irán a disposición final.

En el 2008, la Coordinación general de la Comisión para la Gestión Integral de los Residuos del D.F. dio a conocer sus planes de construir uno o varios Centros Integrales de Reciclaje y Energía (CIRE), los cuales se pretendía que contaran con una serie de instalaciones para tratamiento de RSU, como se muestra en la Tabla 8-6.

Tabla 8-6 Propuesta de CIRE emitida por el GDF en el 2008

Clave	Descripción	Capacidad (t/d)	Superficie requerida (Ha)	Inversión MDP
Gobierno del Distrito Federal : Dirección General de Servicios Urbanos				
CEA	Centro de Educación Ambiental	NA	1	146
VIV	Vivero	NA	4	4
ARE	Área recreativa	NA	2	16
BAR	Barrera forestal Vialidades Servicios	NA	24	70.5
Gobierno del Distrito Federal : Comisión para la Gestión Integral de Residuos				
CEA	Estudios y proyectos	NA	NA	15.5
			Inversión total GDF	252
Fondo metropolitano				
T01	Terreno en Tláhuac	NA	120	180
			Inversión total Fondo metropolitano	180
Sector Privado				
PT1	Planta de selección y recuperación con compactación	2,000	15	728.5
PT2	Planta de Composta	300	25	60
PT3	Planta de digestores	300	10	180
PT4	Planta de pellet para recuperación de plásticos	ND	3	36
PT5	Planta de tratamiento de residuos de la construcción	1,000	7	14.6
PT6	Planta de tratamiento de llantas	ND	3	3
PT7	Planta de residuos electrónicos	ND	3	3.4
PT8	Plantas de tratamiento térmico con generación eléctrica	1,500	30	1,095
PT9	Planta de tratamiento de agua	ND	1	10
RF	Reserva para futuras plantas de reciclaje y/o energía	ND	20	----
ATE	Almacén temporal de energía	ND	52	228
		Área total	200	
		2,358.5		
Inversión total		2,790.5		

Fuente: (Cabrera, 2010)

Como se puede observar, la propuesta del GDF incluía tipos de tratamientos, capacidades y costos aproximados, sin embargo, no se contaba con un estudio detallado que demostrara la factibilidad de implementar las tecnologías propuestas para el tratamiento de los RSU del D.F. siendo ese el

caso de las plantas de digestores³⁵ y de las plantas de tratamiento térmico con generación de energía eléctrica³⁶.

Por lo anterior, el primer paso fue identificar y evaluar los diferentes tipos de tratamiento térmico existentes, estudio previo desarrollado por Cabrera (2010) y los diferentes tipos de tratamiento de la fracción orgánica de RSU, estudio previo realizado por Palacios (2011), ambos estudios se pueden consultar si se desea conocer a profundidad el trabajo realizado en cada uno de ellos.

A continuación se muestra un extracto de los puntos más importantes que se consideraron en ambos estudios (mencionados anteriormente) y sus resultados. A partir de ahí, se continuará con la profundización de los resultados obtenidos, incorporándolos a este nuevo estudio como base teórica fundamental de la selección de una tecnología para tratamiento de la fracción orgánica y una tecnología de tratamiento térmico para RSU.

8.2.1 Alternativas de Tratamiento Térmico para los RSU del D.F.

En el trabajo de investigación de Cabrera (2010) se realizó una revisión bibliográfica de los diferentes tipos de tratamientos térmicos que se usan o se han utilizado para RSU a nivel internacional:

- a) Combustión con exceso de aire (incineración)
- b) Gasificación convencional
- c) Gasificación por arco de plasma
- d) Pirólisis

Mediante una matriz de decisión y el uso del programa de toma de decisiones (*DecisionLab*®) se evaluaron los siguientes aspectos de cada tecnología:

- Tipo de residuos tratados con esa tecnología.
- Posibles formas de generación de energía.
- Posibles emisiones y residuos del proceso.
- Productos principales del proceso.
- Costos de Inversión, operación y mantenimiento.

Una vez evaluados los criterios, ponderando de acuerdo al interés de resolver una problemática ambiental pero con los costos más bajos posibles, la tecnología que resultó más idónea para ser utilizada para el tratamiento de RSU mezclados fue la de gasificación convencional, seguida por la gasificación por arco de plasma, luego incineración y por último pirolisis.

35 Los digestores en México ya se utilizan, pero en pequeñas escalas y principalmente para el tratamiento de lodos y excretas de ganado, más no hay experiencia nacional de su uso para tratamiento de fracción orgánica de RSU y mucho menos con capacidad para tratar 300 t/d, como se planteó en la propuesta del GD.F..

36 No existen en México plantas de tratamiento térmico con capacidad de tratar 1,500 t/d. A nivel internacional existen plantas de incineración con esa capacidad o mayores, pero en México no está permitida la incineración de RSU.

8.2.2 Alternativas de Tratamiento de la fracción orgánica separada de los RSU mezclados.

En el trabajo de investigación de Palacios (2011) se realizó una revisión bibliográfica de los diferentes tipos de tratamientos para la fracción orgánica de los RSU que se usan a nivel nacional e internacional. En una primera evaluación más general, se revisaron las siguientes tecnologías de tratamiento:

- a) Incineración
- b) Pirólisis
- c) Gasificación
- d) Compostaje
- e) Digestión anaerobia
- f) Fermentación alcohólica
- g) Transesterificación

Después de descartar las tecnologías con menos experiencia probada o reportada en el mundo, las que se vieran limitadas por capacidad de tratamiento, las que presentaran características de alimentación más estrictas y las que generaran productos de menor calidad, se redujeron las alternativas a las siguientes:

- a) Compostaje
- b) Digestión anaerobia

Una vez seleccionadas estas dos tecnologías, se procedió a evaluar mediante una matriz de decisión y un programa de toma de decisiones (*DecisionLab*®), la tecnología que mejor cubriera las necesidades de capacidad instalada, tiempos de tratamiento, número de plantas en operación, posibles emisiones y consumo de agua.

Después de analizar ambos estudios, se determinaron los 6 criterios más importantes a considerar para la selección de las dos tecnologías más adecuadas para el tratamiento térmico y el tratamiento biológico de la fracción mezclada y la orgánica respectivamente: el tipo de residuos que tratan, su desarrollo comercial, la recuperación/utilización de la energía, su impacto ambiental, credibilidad en los proveedores de la tecnología y algunas exclusiones.

Tabla 8-7 Descripción de los criterios de selección

Tipo de residuo	La tecnología debe ser capaz de tratar y procesar Residuos Sólidos Urbanos Mezclados o Residuos orgánicos separados en fuente, dependiendo el caso.
Desarrollo comercial	El proceso ya debe estar probado comercialmente y estar actualmente en operación en una instalación a escala piloto con capacidad para mínimo una tercera parte de lo que se pretende tratar para el Distrito Federal.
Recuperación o utilización de energía	El proceso debe ser un productor neto de energía. La combustión del gas de síntesis o biogás es aceptable si se considera como parte de un proceso integral.
Impacto ambiental	El proceso debe ser capaz de cumplir con los requerimientos más estrictos de emisiones a la atmósfera. El proceso no debe generar residuos peligrosos que sean difíciles de manejar o de disponer.
Credibilidad en los proveedores de la tecnología	Los proveedores deben ser organizaciones serias con las bases de ingeniería y recursos económicos suficientes para diseñar, construir, administrar y garantizar la tecnología que ofrecen.
Exclusiones	El proceso no debe ser incineración ni ser percibido por la gente como tal.

Al aplicar los criterios de selección, además de los estudios previos ya mencionados se estableció que las tecnologías más idóneas para ser evaluadas conjuntamente para su implementación en el tratamiento de RSU del D.F. eran la gasificación y la digestión anaerobia para RSU mezclados y fracción orgánica separada en fuente, respectivamente.

8.3 Marco teórico de las tecnologías seleccionadas: digestión anaerobia y gasificación.

Para conocer más a profundidad lo que cada tecnología puede ofrecer y cuáles son sus requerimientos técnicos básicos se realizó una investigación profunda que se resume a continuación.

8.3.1 Digestión Anaerobia

Para la transformación de los materiales de residuos orgánicos se han utilizado más frecuentemente tecnologías de transformación biológica, de las cuales existen básicamente dos tipos de proceso, los aerobios y los anaerobios. Cada proceso ofrece distintas ventajas, como se puede ver en la Tabla 8-8.

Tabla 8-8. Características de los procesos aerobios y anaerobios para tratamiento de la FORSU

Característica	Procesos aerobios	Procesos anaerobios
Uso energético	Consumidor neto de energía	Productor neto de energía
Productos finales	Humus, CO ₂ , H ₂ O	Fangos, CO ₂ , CH ₄
Reducción de volumen	Hasta el 50%	Hasta el 50%
Tiempo de procesamiento	20-30 días	20-40 días
Objetivo primario	Reducción de volumen	Producción de energía
Objetivo secundario	Producción de composta	Reducción de volumen, estabilización de residuos

Fuente: (Tchobanoglous, 1993)

La digestión anaerobia es un tratamiento de tipo biológico, que opera en ausencia de oxígeno, por lo que diferentes grupos de bacterias anaerobias biodegradan los compuestos orgánicos generando como resultado de su metabolismo, un biogás, que consiste principalmente en metano y dióxido de carbono, pero contiene impurezas como agua, H₂S y partículas sólidas. El proceso requiere de condiciones controladas, entre las que destacan la relación carbono/nitrógeno (C/N) que se considera óptima entre 20 y 30; el pH óptimo es entre 5.5 y 8.5, dependiendo de la etapa del proceso de digestión anaerobia y el contenido de humedad (Verma, 2002).

Los sistemas de digestión anaerobia se pueden clasificar según la entrada de alimentación como procesos batch o continuos. Estos, se clasifican a su vez según el número de etapas como sistemas de una etapa, o de etapas múltiples.

La digestión anaerobia con alto contenido de sólidos es en la que la fermentación ocurre con un contenido total de sólidos de cerca del 22% o más. Se trata de una tecnología relativamente nueva que requiere menos cantidad de agua que la digestión anaerobia de bajo contenido de sólidos, además de generar mayor cantidad de gas por unidad de volumen del reactor. Hasta los años noventa, este tipo de procesos carecían de plantas a gran escala operando (Tchobanoglous, 1993). Sin embargo, actualmente se cuenta con experiencias internacionales que sirven de referencia, además de numerosos datos bibliográficos que permiten estimar los parámetros de diseño de este tipo de sistemas.

Dentro de los tipos de digestión anaerobia, se encuentran los sistemas secos de una etapa, los cuales pueden ser verticales u horizontales, y operan en condiciones mesofílicas o termofílicas, dependiendo de las características de alimentación y de los requisitos económicos. Dependiendo del sistema comercial, estos pueden contar o no con un sistema de mezclado, y con recirculación de biosólidos y/o biogás (Palacios, 2011).

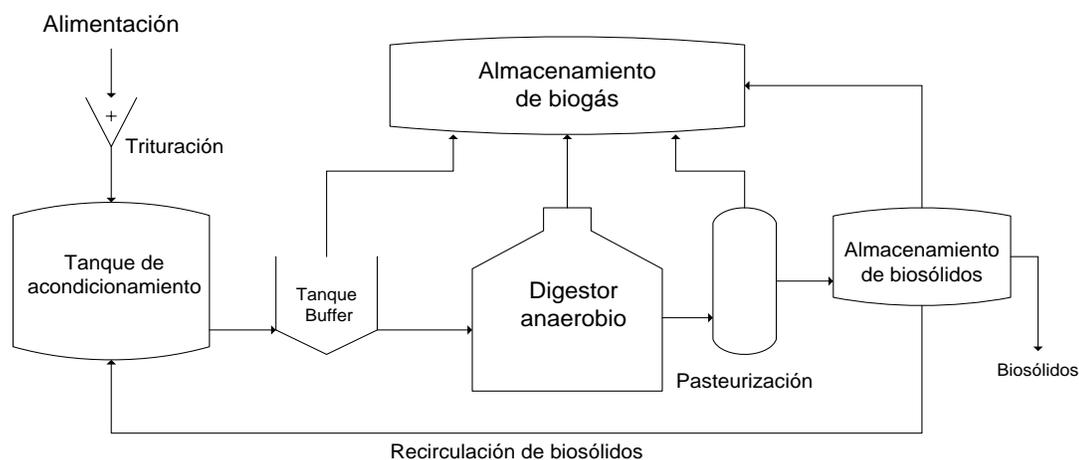


Figura 8-1. Diagrama típico del proceso de digestión anaerobia.

Fuente: (Palacios, 2011)

8.3.2 Biogás generado en la digestión anaerobia

Como producto de la biodegradación de los compuestos orgánicos en condiciones completamente anaerobias se genera biogás. Los principales componentes del biogás son el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2). Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se presenta en la Tabla 8-9 (Werner, 1989).

Tabla 8-9. Composición del biogás

Compuesto	Análisis típico (%Volumen)
CH_4	55 – 65
CO_2	35 – 45
H_2S	0 – 1
N_2	0 – 3
H_2	0 – 1
O_2	0 – 2
NH_3	0 – 1

Fuente: (Balat, 2009)

Debido a su elevado contenido de metano, el biogás puede ser usado directamente en motores de combustión interna (MCI) y turbinas de gas (TG) para generar electricidad (Williams, 2005). El gas natural contiene entre 90% y 95% de metano, así que básicamente el biogás es gas natural de grado bajo. La composición del biogás es un parámetro esencial, ya que permite identificar el sistema de limpieza adecuado, que permita remover al sulfuro de hidrógeno, y disminuir el volumen de agua, lo cual contribuye a mejorar las características del biogás como combustible (Espinoza, 2011).

Para calcular la cantidad de biogás que se puede producir con un tratamiento de digestión anaerobia, es necesario contar con información básica de la composición del biogás, la cual se resume en la Tabla 8-10.

Tabla 8-10 Composición y parámetros de gas de diferentes fuentes

Parámetro	Unidad	Biogás de Relleno Sanitario	Biogás de Digestión Anaerobia	Gas Natural del mar del Norte	Gas Natural Alemán
Poder Calorífico Inferior	MJ/nm ³	16	23	40	31.6
	kWh/nm ³	4.4	6.5	11	8.8
	MJ/kg	12.3	20.2	47	38
Densidad	Kg/nm ³	1.3	1.2	0.84	0.8
Índice de Wobbe	MJ/nm ³	18	27	55	43.7
Número de metano		>130	>135	70	-
Metano	Vol-%	45	63	87	81
Variación de metano	Vol-%	35-65	53-70	-	-
Hidrocarburos	Vol-%	0	0	12	3.5
Hidrógeno	Vol-%	0-3	0	0	-
Monóxido de carbono	Vol-%	0	0	0	0
Variación de dióxido de carbono	Vol-%	40	47	1.2	1
Nitrógeno	Vol-%	15	0.2	0.3	14
Variación de nitrógeno	Vol-%	5-40	-	-	-
Oxígeno	Vol-%	1	0	0	0
Variación de oxígeno	Vol-%	0-5	-	-	-
Ácido Sulphídrico	Ppm	<100	<1000	1.5	-
Variación de ácido sulphídrico	Ppm	0-100	0-10000	1-2	-
Amonio	Ppm	5	<100	0	-
Cloro total (como Cl ⁻)	mg/nm ³	20-200	0-5	0	-

Fuente: Tomado de Persson (2006)

8.3.3 Gasificación

El procesamiento térmico de los residuos sólidos se define como la conversión de los residuos sólidos en productos de conversión gaseosos, líquidos y sólidos, con la simultánea o subsiguiente generación de energía.

La gasificación convencional es un proceso de conversión termoquímica en la cual ocurre una oxidación parcial de la materia orgánica en la que es convertida en un combustible gaseoso llamado gas de síntesis (syngas) el cual contiene principalmente CO₂, CO, H₂, CH₄ y H₂O. La oxidación parcial se puede llevar a cabo con diferentes agentes gasificadores como el aire, el aire enriquecido de oxígeno, oxígeno puro o vapor, aunque lo más común por su bajo costo es utilizar aire. Las temperaturas empleadas son altas, van de los 900 a 1,100 °C cuando se utiliza aire; y de 1,000-1,400°C cuando se utiliza oxígeno. La gasificación con aire es la tecnología más utilizada ya que los

costos son más bajos, obteniendo gases con un poder calorífico bajo. La gasificación con oxígeno resulta en una mejor calidad del gas, obteniéndose un poder calorífico del doble de magnitud (UNAM, 2009).

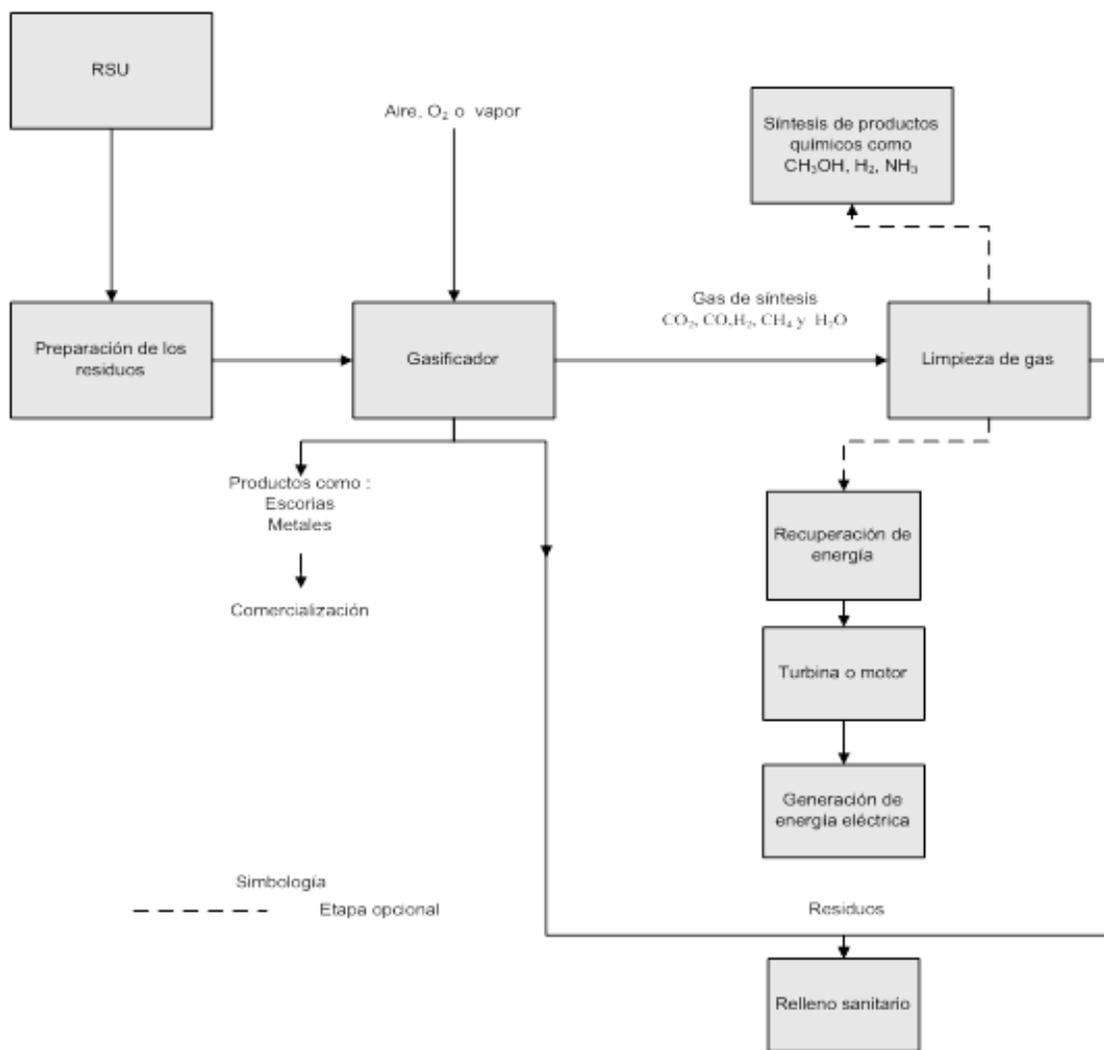


Figura 8-2. Diagrama del proceso de gasificación con limpieza de gases y generación de energía

Fuente: (UNAM, 2009)

Otro producto de la gasificación que se puede obtener es el slag, el cual se produce como resultado de la fundición de los materiales inorgánicos dentro del gasificador, ya que se encuentra a altas temperaturas (por encima de 1,100 °C), formando una escoria fundida que después de abandonar el gasificador se somete a un baño de agua con el cual se solidifica, formando un material vidrioso y no peligroso, que puede eliminarse de manera segura, o ser utilizada para la producción de tejas, arena, cemento, asfalto o como relleno.

Los gasificadores de lecho fluidizado se componen de un reactor vertical con una parrilla en la parte inferior, a través de la cual se inyecta el oxidante (oxígeno, vapor con aire), que entra en contacto con una corriente de aire ascendente, permitiendo que las partículas sólidas queden suspendidas formando un lecho fluidizado, la alimentación de los residuos es introducida por la parte superior del reactor, mientras el aire provee el medio fluidizante en el cual se realizan las reacciones termoquímicas de la gasificación.

Específicamente se plantea el uso de un gasificador de lecho fluidizado circulante, el cual tiene la característica de que consta de una cámara donde se hace circular una corriente turbulenta de aire, que es alimentado por la parte inferior, a diferencia del proceso de gasificación por lecho fluidizado, el diseño del reactor contiene una recirculación lateral, en el cual la mezcla de aire y sólido rotan de vuelta a la cámara, formando una corriente circulante, el aire incrementa su velocidad mientras que se introduce en la cámara la materia sólida, de forma que ésta se expande generando un lecho fluidizado, en el cual se llevará a cabo las reacciones de gasificación (UNAM, 2009).

8.3.4 Gas de Síntesis como producto de la gasificación

El producto principal de la gasificación es el gas de síntesis (syngas), el cual puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica o para la síntesis de sustancias como el metanol y el amoníaco (Tchobanoglous, 1994).

El gas de síntesis producido en la gasificación convencional de residuos sólidos urbanos, contiene una mezcla de CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , H_2O , pequeñas cantidades de hidrocarburos pesados, gases inertes, cenizas y otros contaminantes. La composición del syngas es muy variada y depende en gran medida de la materia prima y del proceso de gasificación (Espinoza, 2011).

Según Pichtel (2005), los residuos sólidos urbanos presentan un peso volumétrico de 115 – 180 kg/m^3 , un poder calorífico en bruto de 11.650 MJ/kg, lo cual coincide con los resultados obtenidos del muestreo de los RSU del D.F. Para que el gas de síntesis resulte competitivo frente a los demás combustibles convencionales debe presentar un poder calorífico mayor a 11 MJ/kg.

Existen dos tipos de gasificación, la gasificación directa y la gasificación indirecta. La primera ocurre cuando un agente oxidante es usado para oxidar parcialmente la materia prima. Las reacciones de oxidación proporcionan la energía necesaria para mantener constante la temperatura del proceso. Si el proceso no ocurre con un agente oxidante, entonces ocurre la gasificación indirecta, y es necesario proporcionar energía de una fuente externa. El vapor es el agente más común usado en la gasificación indirecta, ya que se produce fácilmente y aumenta el contenido de H_2 en el gas de síntesis (Espinoza, 2011).

De acuerdo a lo publicado en la COPAR 2009, algunas de las ventajas importantes de la gasificación integrada a un ciclo combinado son la flexibilidad en el uso de casi cualquier tipo de combustible, una eficiencia neta del ciclo termodinámico de hasta 42% (referido al poder calorífico superior y a 100% de carga) y la obtención de azufre comercial; pero lo más importante es la considerable reducción de las emisiones contaminantes del aire. Con el proceso IGCC Integrated Gasification Combined Cycle (Sistema de gasificación integrado a un ciclo combinado) es posible cumplir las más estrictas normas ambientales nacionales e internacionales.

8.4 Experiencia operacional que respalda la propuesta de digestión anaerobia y gasificación de RSU.

Ambas tecnologías se propusieron después de amplios estudios bibliográficos y contacto directo o indirecto con diferentes tecnólogos. A continuación se muestra un resumen de los hallazgos.

8.4.1 Digestión anaerobia de fracción orgánica de RSU

El proceso de compostaje tiene un mayor número de años de llevarse a cabo que la digestión anaerobia, de hecho, hay plantas en todo el mundo con capacidades instaladas de alrededor de 1,200 t/d (Flukong Enterprise Inc., 2009) y en México, la planta de Bordo Poniente alcanzará próximamente las 2,000 t/d con expectativas de alcanzar las 3,000 t/d (López, 2010).

Actualmente la digestión anaerobia está tomando fuerza alrededor del mundo, principalmente en los países desarrollados debido a que se requieren superficies menores, la calidad de subproductos es mejor, el tiempo de tratamiento es más corto y además se puede obtener biogás. El biogás se puede separar del condensado, limpiar de sulfuros y utilizarse para motores de gas, o bien, se puede utilizar para generar energía eléctrica.

En el 2008, según la International Energy Agency, había 115 plantas de digestión anaerobia que trataban fracción orgánica de RSU. Dichas plantas se reportaban principalmente en Europa y Japón (International Energy Agency , 2008). Las capacidades instaladas en ese año iban de 8 a 1,363 t/d (Palacios, 2011).

Para el año 2010, esta misma agencia reportó 178 plantas de digestión anaerobia en países de Europa. En la Tabla 8-11 se realizó un resumen del número de plantas que reportan diferentes países, para el tratamiento de la fracción orgánica de RSU, en el periodo 2009-2010. Así mismo, algunos países cuentan con un número específico de plantas en construcción o en proceso de planeación a futuro y su generación esperada de energía, las cuales se mencionan en la sexta y séptima columna respectivamente.

Tabla 8-11 Número de plantas de digestión anaerobia que procesan RSU en el mundo.

País	En el año	Número de Plantas instaladas	Capacidad	Generación de Energía	Plantas planeadas o en construcción	Generación esperada de energía
Suecia	2008	17	NE	240 GWh	NE	NE
Suiza	2009	23	NE	88.3 GW/a	4	NE
Finlandia	2009	3	NE	63 GWh	NE	NE
Noruega	2010	14	NE	159 GWh	13	166 GWh
Reino Unido	2010	3	NE	NE	3	NE
Francia	2010	7	NE	NE	29	NE
Irlanda	2010	NE	NE	NE	5	NE
Turquía	2010	1	342 Nm ³ /h	No generan energía	NE	NE
Austria	2010	30	NE	NE	NE	NE
Alemania	2011	80	500-800 Nm ³ /h	3.5 TWh/a	1000-1400	60 TWh/a

Fuente: (Heinrich, 2010; Govasmark, 2010; Wellinger, 2010; Hardwood, 2010; Bastide, 2010; Murphy, 2010; SGC, 2010; IEA Bioenergy, 2010; Rintala, 2010; Braun, 2010).

Para saber qué tipo de sistemas y condiciones de digestión anaerobia se están utilizando más a nivel internacional para tratar específicamente residuos orgánicos separados y no separados en fuente, fue necesario realizar una búsqueda aún más detallada, que permitiera detectar las tecnologías más utilizadas, volúmenes de reactor, pretratamientos y post-tratamientos más utilizados y generación de biogás de acuerdo al tipo de residuo y cantidades tratadas.

De dicha investigación se realizaron tablas resumen que permiten comparar tipos de RSU alimentados, capacidades, tamaños de reactor, tipos de pretratamientos utilizados, etcétera.

Tabla 8-12 Experiencias internacionales de plantas de digestión anaerobia a gran escala.

Ubicación (Tecnología)	Capacidad de la Planta	Tipo de Residuo	Volumen del reactor	Inicio de Operación	Parámetros de operación	Pretratamiento	Post tratamiento
Calais, Francia (Valorga)	28,000 t/año	27,000 t/año de residuos orgánicos separados en fuente y 1,000 t/año restos de animales y plantas, grasas y aceites.	1 x 3,100 m ³	2007	Tiempo de retención: 25 días Producción de biogás: 110 -120 Nm ³ /t _{RSU} Entrada ó 60 – 65 Nm ³ /t _{SVT} Entrada Cogeneración (944 kWe)	Separación mecánica	Post-compostaje en contenedores aereados.
Leonberg, Alemania (Dranco)	30,000 t/año	Residuos orgánicos (restos de animales y plantas)	2,440 m ³	2004	No especificado	Los residuos se someten a: 1) Triturador 2) Criba rotatoria (60 mm) 3) Separador magnético 4) Unidad de dosificación 5) Bomba de alimentación	El digestato se somete a: 1) Secador de cinta 2) Compostaje aerobio El gas se almacena y se usa en motores de gas para generación de electricidad y calor
Tondela, Portugal (Valorga)	35,000 t/año	30,000 t/año de RSU y 5,000 t/año de residuos separados de fuente	1 x 3,500 m ³	2009	Sistema mesofílico Producción de biogás: 130 Nm ³ /t _{RSU} Entrada	Separación mecánica	Post-compostaje
Engelskirchen, Alemania (Valorga)	35,000 t/año	35,000 t/año de residuos orgánicos (restos de animales y plantas). Todo con una relación de 36% de ST y 70% de SVT	2 x 3,000 m ³	1998	Sistema termofílico Tiempo de retención: 25 días Producción de biogás: 100 -110 Nm ³ /t _{RSU} Entrada Generación de calor y energía (940 kWe)	Separación mecánica	Post-compostaje

Tabla 8-12 Experiencias internacionales de plantas de digestión anaerobia a gran escala. (Continúa)

Ubicación (Tecnología)	Capacidad de la Planta	Tipo de Residuo	Volumen del reactor	Inicio de Operación	Parámetros de operación	Pretratamiento	Post tratamiento
Amiens Plant, Francia (Valorga)	85,000 t/año	RSU con relaciones de 60% de ST y 63 % de SVT	3 x 2,400 m ³ (1988) 1 x 3 500 m ³ (1996)	No especificado	Tiempo de retención: 18-22 días Producción de biogás: 140–160 Nm ³ /t _{RSU} Entrada ó 220 – 250 Nm ³ /t _{SVT} Entrada Consumo 5,500 kW	Separación mecánica	No especificado
Saint Priest La Roche (Valorga)	85,000 t/año	RSU	3 x 2,200 m ³	2010	Producción de biogás: 130 –140 Nm ³ /t _{RSU} Entrada Generación de electricidad y calor	Separación mecánica	Post-compostaje en contenedores aireados. Disposición final en relleno sanitario.
Zaragoza, España (Valorga)	95,000 t/año	RSU	4 x 3,600 m ³	2008	Sistema mesofílico Producción de biogás: 120 Nm ³ /t _{RSU} Entrada Generación de electricidad: 4 Mwh Generación de vapor por cogeneración	Separación mecánica	Post-compostaje Tratamiento de aire.
Varenes-Jarcy, Francia (Valorga)	100,000 t/año	70,000 t/año de RSU y 30,000 t/año de otros residuos orgánicos separados en fuente	2 x 4,200 m ³ – 1 x 4,500 m ³	2002	Sistema mesofílico Tiempo de retención: 25 días Producción de biogás: 154 Nm ³ /t _{RSU} Entrada ó 245 Nm ³ /t _{SVT} Entrada Generación de calor y electricidad: 3 Mwh	Separación mecánica	El digestato se somete a: 1) Post-compostaje 2) Volteo y aereación mecánica 3) Tratamiento de aire

Tabla 8-12 Experiencias internacionales de plantas de digestión anaerobia a gran escala. (Continúa)

Ubicación (Tecnología)	Capacidad de la Planta	Tipo de Residuo	Volumen del reactor	Inicio de Operación	Parámetros de operación	Pretratamiento	Post tratamiento
Hanover, Alemania (Valorga)	100,000 t/año	Residuos separados mecánicamente	3 x 4,200 m ³	2005	Sistema mesofílico Tiempo de retención: 25 días Producción de biogás: 90 Nm ³ /t _{RSU} Entrada ó 190–220 N m ³ /t _{SV} Entrada Generación de calor y electricidad	Separación mecánica	El digestato se somete a: 1) Post-compostaje 2) Aereación mecánica 3) Tratamiento de aire
Hille, Alemania (Dranco)	100,000 t/año	Desechos residuales	2,260 m ³	2005	No especificado	Los residuos se someten a: 1) Trituración 2) Criba rotatoria 3) Separador magnético 4) Separador de aire 5) Separador de metales no ferrosos 6) Separador balístico	El digestato se somete a: 1) Unidad de mezclado 2) Compostaje 3) Disposición final en relleno sanitario
Bayonne, Francia (Dranco)	100,196 t/año	83,696 t/año de RSU; 15,000 t/año de RSU separados en fuente y 1,500 t/año de otros residuos orgánicos	2 x 3,800 m ³	Planeado para el 2013	Sistema mesofílico Producción de biogás: 140 Nm ³ /t _{RSU} Entrada Generación de calor y electricidad	Preparación de bioreactores y separación mecánica.	El digestato se somete a: 1) Post-compostaje 2) Volteo y aereación mecánica 3) Tratamiento de aire
Holanda (Waasa)	101,000 t/año	Fracción orgánica de RSU de 275,000 t/año de RSU. Se manejan de 4-8 kg SV/ m ³ /d	4 x 2,740 m ³	No especificado	Producción de biogás: 100 - 150 Nm ³ /t _{RSU} Entrada	Preselección de la fracción orgánica de los RSU	No especificado

Tabla 8-12 Experiencias internacionales de plantas de digestión anaerobia a gran escala. (Continúa)

Ubicación (Tecnología)	Capacidad de la Planta	Tipo de Residuo	Volumen del reactor	Inicio de Operación	Parámetros de operación	Pretratamiento	Post tratamiento
Alicante, España (Dranco)	180,000 t/año	Residuos mezclados	2,600 m ³	2008	No especificado	Los residuos mezclados se someten a: 1) Criba (400 mm) 2) Separación manual 3) Trituración 4) Separador magnético 5) Unidad de dosificación 6) Bomba de alimentación	El digestato se somete a: 1) Trituración 2) Mezclado 3) Compostaje aerobio 4) Refinación El biogás se usa en motores de gas y generadores.
La Coruña, España (Valorga)	182,000 t/año	RSU	4 x 4,300 m ³	2001	Sistema mesofílico Tiempo de retención: 16 – 20 días Producción de biogás: 130–150 Nm ³ /t _{RSUentrada} ó 250–270 Nm ³ /t _{SVEntrada} Electricidad (5 x 1,250 kW) y generación de calor	Separación mecánica	El digestato se somete a: 1) Post-compostaje 2) Volteo y aireación mecánica
Las Dehesas, Spain (Valorga)	195,200 t/año	RSU	6 x 3,600 m ³	2008	Sistema mesofílico Producción de biogás: 130 Nm ³ /t _{RSUentrada} Generación de electricidad y de vapor mediante cogeneración	Separación mecánica	Post-compostaje

Tabla 8-12 Experiencias internacionales de plantas de digestión anaerobia a gran escala. (Continúa)

Ubicación (Tecnología)	Capacidad de la Planta	Tipo de Residuo	Volumen del reactor	Inicio de Operación	Parámetros de operación	Pretratamiento	Post tratamiento
Abrunheira, Portugal (Valorga)	200,000 t/año	160,000 t/año de RSU y 40,000 t/año de otros residuos orgánicos	2 x 3,700 m ³ de RSU y 1 x 3,700 m ³ de residuos orgánicos separados	2010	Sistema termofílico Producción de biogás: 130-150 Nm ³ /t _{RSUentrada} Generación de calor y electricidad	Separación mecánica	El digestato se somete a: 1) Maduración aerobia
Barcelone – Ecoparque II, Spain (Valorga)	240,000 t/año	218,000 t/año de RSU y 22,000 t/año de otros residuos orgánicos. Se buscan relaciones de 42% de ST y 58% de SV	3 x 4,500 m ³	No especificado	Sistema mesofílico Tiempo de retención: 25 días Producción de biogás: 114 Nm ³ /t _{RSUentrada} ó 260 Nm ³ /t _{SVTentrada} Generación de electricidad (4 Mwe)	Separación mecánica y manual	El digestato se somete a: 1) Post-compostaje en contenedores aereados
Shangai, China (Valorga)	268,500 t/año	227,500 t/año de residuos domiciliarios y 41,000 t/año de residuos orgánicos	6 x 4,500 m ³	2008	Sistema termofílico Tiempo de retención: 25 días Producción de biogás: 100 Nm ³ /t _{RSUentrada} ó 55-60 Nm ³ /t _{SVTentrada} Cogeneración	Separación mecánica	El digestato se usa en incineración como combustible o se somete a maduración aerobia.

Tabla 8-12 Experiencias internacionales de plantas de digestión anaerobia a gran escala. (Continúa)

Ubicación (Tecnología)	Capacidad de la Planta	Tipo de Residuo	Volumen del reactor	Inicio de Operación	Parámetros de operación	Pretratamiento	Post tratamiento
Romainville-Bobigny, France (Valorga)	412,000 t/año	32,000 t/año de RSU (previamente separados para digestión anaerobia) + 60,000 t/año de objetos complicados + 30,000 t/año de RSU	6 x 3,300 m ³	2011	Sistema mesofílico Producción de biogás: 130-140 Nm ³ /t _{RSU} entrada ó 106 Nm ³ /t _{SV} entrada Generación de electricidad y de calor. El biogás se inyecta a la red después de su purificación.	Separación mecánica	Incineración y maduración aerobia.
Fos sur Mer, France (Valorga)	497,600 t/año	410,000 t/año de residuos sólidos orgánicos; 83,400 de RSU t/año y 4,200 t/año de RSU separados	2 x 4,200 m ³	2008 / 2009	Sistema mesofílico Producción de biogás: 162 Nm ³ /t _{RSU} entrada Generación de calor y electricidad	Separación mecánica	El digestato se usa en incineración como combustible o se somete a maduración aerobia.

Fuentes: (Kompogas, 2007; California Integrated Waste Management Board, 2008; Organic Waste Systems, 2011; Valorga International, 2011).

8.4.2 Gasificación de RSU mezclados

En cuanto al proceso de gasificación convencional, se realizó una revisión exhaustiva de la aplicación del proceso de gasificación para el tratamiento de RSU, se encontró que la mayor parte de las tecnologías reportadas para este uso, se dirigen más al tratamiento de biomasa o fracción orgánica de los RSU, sin embargo, sí se encontraron varias tecnologías con plantas instaladas alrededor del mundo que gasifican residuos mezclados. Cabe mencionar que los residuos mezclados de otros países (países desarrollados principalmente), ya cuentan con cierta separación desde el origen, por lo que su fracción mezcla no es comparable con la fracción mezcla que se maneja actualmente en México.

La gasificación de RSU se encuentra en desarrollo, pero cada vez despierta mayor interés en su utilización para tratamiento de RSU, prueba de ello es el creciente número de plantas de este tipo que se han puesto en operación a partir del año 2000. La mayoría de las plantas que fueron revisadas (en artículos científicos, reportes técnicos, estudios y evaluaciones tecnológicas – económicas, bases de datos, conferencias, páginas de proveedores y folletos) muestran capacidades instaladas que no rebasan las 500 t/d.

La Tabla 8-13 muestra algunas de las plantas instaladas en el mundo, la capacidad que manejan, el año de inicio de operaciones, las características requeridas de los RSU alimentados y el uso del gas de síntesis.

Tabla 8-13 Plantas instaladas de gasificación que tratan RSU

Ubicación	Capacidad (t/d)	Inicio de operaciones	Capacidad térmica	Poder calorífico de los RSU (MJ/kg)	Humedad de los RSU (%)	Uso del gas de síntesis
Nagasaki / Thermosteel	300	2005	NE	NE	NE	Generación de potencia eléctrica en motores de gas y calderas
Kurashiki / Thermosteel	612	2005	NE	NE	NE	Se transfiere a Steel Works
Tokushima / Thermosteel	120	2005	NE	NE	NE	Generación de potencia eléctrica interna
Mutsu / Thermosteel	2x96	2003	2.4 MW	7.1-9.3	50%	Generación de potencia eléctrica interna en motores de gas
Chiba / Thermosteel	2x150	2000	1.5 MW	7-13	30-60%	Motor de gas y celda de combustible en prueba
Akita / Nippon Steel	2x220	2002	8.5 MW	NE	NE	NE
Sakata Area Clean Union / Ebara	2x98	2002	2x12.3MW	10.9	NE	NE
Kawaguchi / Ebara	3x140	2002	3x21MW	13.0	NE	Generación de electricidad recuperando energía en calderas
Ciudad Ube / Ebara	3x66	2003	3x9.5MW	12.5	NE	Generación de energía
Union Chuno / Ebara	3x56	2003	3x7.3MW	11.3	NE	Generación de energía
MinamiShinshu / Ebara	2x46.5	2003	2x4.5MW	8.4	NE	Generación de energía
Nagareyama / Ebara	3x69	2004	3x9.3MW	11.7	NE	Generación de energía
Ciudad Hino Shiga área central/ Ebara	3x60	2007	3x5.2MW	13.0	NE	Generación de energía
Sodegaura/ Ebara	15	2004	NE	NE	NE	Generación de energía
Genting/Entech	60	1998	6.9 MW	NE	NE	Generación de energía
Niihama/ Sumimoto Heavy Industries Ltd.	20	1999	NE	NE	NE	Generación de energía
Isla de Wight / Energos	90	2008	1.8 MW	11-14	NE	Generación de electricidad
Knowsley Business Park / Energos	260	2011	NE	NE	NE	El vapor de alta temperatura se usa para generar electricidad

Fuentes: Sato, 2000; Osada, 2002; Columbia University, 2005; URS, 2005; Cambell, 2008; EBARA, 2007; DEFRA, 2007; Entech,2009).

Como se pudo observar, en ambos casos (digestión anaerobia y gasificación) las plantas en operación se encuentran en Europa, sin embargo, en América del Norte también empiezan a desarrollarse estas dos tecnologías para el tratamiento de RSU. Si bien, tanto en Canadá como en Estados Unidos la mayoría de las plantas instaladas de gasificación son demostrativas o a escala piloto y no a escala comercial, ya existen al menos dos con estas características, una en British Columbia, Canadá y otra en Georgia, Estados Unidos.

A continuación se muestra la distribución de las plantas demostrativas, piloto o en construcción de digestión anaerobia y gasificación de RSU en América del Norte.



Figura 8-3 Localización de las plantas de gasificación y digestión anaerobia existentes en EUA y Canadá

8.4.3 Proveedores con experiencia en tecnología de digestión anaerobia

Para seleccionar a los proveedores más adecuados de tecnología de digestión anaerobia se buscó que la información proporcionada por ellos o la publicada por las plantas que ellos operan cumplieran con los siguientes puntos importantes:

- a) Que la tecnología trate el tipo de residuo de interés, es decir, fracción orgánica separada en fuente que contiene principalmente restos de comida, frutas y verduras.

- b) Que la tecnología ya se esté aplicando comercialmente y esté actualmente operando con capacidad instalada de mínimo 200 t/d (73,000 t/año).
- c) De preferencia el proceso debe ser un productor neto de energía.
- d) El proceso debe ser capaz de cumplir con los requerimientos más estrictos de emisiones a la atmósfera y no debe generar residuos peligrosos que sean difíciles de manejar o de disponer.
- e) Los proveedores de dichas tecnologías deben ser organizaciones serias con las bases de ingeniería y recursos económicos suficientes para diseñar, construir, administrar y garantizar la tecnología que ofrecen.

Los proveedores que de acuerdo a los criterios anteriores mostraron mayor número de plantas en operación fueron: Kompogas con más de 38 plantas con capacidades entre 1,000 a 110,000 t/año; Valorga, con más de 22 plantas con capacidades de 10,000 a 270,000 t/año; Dranco, con más de 17 plantas con capacidades de 3,000 a 120,000 t/año y Waasa con más de 10 con capacidades entre 3,000 a 230,000 t/año. Los procesos de cada una de las tecnologías mencionadas se describen brevemente a continuación:

Kompogas®

El sistema de Kompogas® utiliza un digestor de flujo pistón, horizontal con rotores internos para ayudar a la desgasificación y homogenización de los residuos. El sistema se fabrica principalmente en dos tamaños estandarizados: 1) De 16,500 t/año y 2) de 27,000 t/año. Si se desea una mayor capacidad, se puede obtener mediante la combinación de varias unidades en paralelo. El sistema es seco y opera con tiempos de retención de 15 – 20 días bajo condiciones termofílicas. La producción de biogás se ha reportado con un peso húmedo de 0.11 – 0.13 m³/kg. El contenido de sólidos no se encontró reportado en la literatura. Actualmente se encuentran operando al menos 30 sistemas en Europa de los 38 que enlista la página corporativa de Kompogas® (California Integrated Waste Management Board, 2008)..

La planta más antigua de Kompogas® fue instalada en 1989 en Rümlang, Suiza con una capacidad de 500 toneladas por año, más nueva (hasta el 2009) es la de Sierre, Suiza, con una capacidad para tratar 70,000 t/año y la más grande que se ha registrado es la de Montpellier, Francia, con capacidad para 100,000 t/año, la cual se instaló en el 2008 (Axp-Kompogas, 2011).

Dranco®

El sitio web de Organic Waste Systems (OWS), una compañía Belga que inició en 1988, describe que el proceso Dranco® puede ser termofílico o mesofílico, sistema de una etapa de fermentación anaeróbica seguida de una fase corta de maduración aerobia. El proceso se lleva a cabo en un digestor cerrado, el tiempo de retención es de 20 días y se trata de un sistema seco. El residuo digerido se extrae del digestor y se estabiliza con tratamiento aerobio. El producto final es seguro y está estabilizado.

La tecnología de Dranco® puede ser usada para varios tipos de residuos orgánicos, tales como la fracción orgánica de RSU mezclados, biosólidos³⁷ y otras corrientes de residuos orgánicos separados en fuente;

³⁷Los biosólidos son definidos por la EPA como “residuos sólidos, semisólidos o líquidos generados durante el tratamiento de aguas servidas domiciliarias. Los biosólidos incluyen las escorias o sólidos removidos durante el tratamiento primario, secundario o avanzado del proceso de tratamiento de aguas servidas y cualquier material derivado de los lodos, excepto las gravillas o cenizas generadas durante el proceso de incineración” (EPA, 1994).

lodo seco y otros tipos de residuos orgánicos incluyendo papel no reciclable, residuos de mercado, residuos de comida y desechos industriales.

Las características del proceso Dranco® son esencialmente:

- Carga de 10 a 20 kg COD ³⁸ por cada metro cúbico de reactor por día.
- Rango de temperatura termofílico: 48 a 57°C o mesofílico: 35 a 40°C.
- Tiempo de retención: 15 a 30 días.
- Producción de biogás: 100 a 200 Nm³ de biogás por tonelada de residuo.
- Producción de electricidad: 220 a 440 kWh por tonelada de residuo.

En cuanto a experiencia, Dranco® cuenta con 24 plantas instaladas, la mayoría en Europa y 7 plantas demostrativas en diferentes partes del mundo y para diferentes tipos de residuos orgánicos. La planta a gran escala más antigua data del año 1992, en Brecht, Bélgica, con una capacidad para 20,000 t/año, las últimas que se instalaron fueron la de Hengelo, Holanda y la de Mirandela, Portugal, ambas instaladas en el 2011 y con capacidad para 50,000 t/año. Entre sus plantas más grandes ya instaladas para tratamiento de residuos destacan las de España, una en Vitoria con capacidad de 120,000 t/año y la de Alicante con capacidad de 180,000 t/año, ambas diseñadas para tratar residuos mezclados. Cabe mencionar que de las plantas diseñadas para tratar puramente residuos orgánicos separados en fuente, la capacidad más grande que reporta Dranco® es la de su planta de Pusan, Korea que trata 70,000 t/año (Organic Waste Systems, 2011).

Valorga®

Valorga International es una empresa francesa, con sede en Montpellier que empezó desde los años 80's. El proceso de Valorga® fue desarrollado desde 1981 y es adecuado para tratar tanto residuos previamente seleccionados como mezclados. Los reactores usan un cilindro vertical con un diseño específico para que el flujo sea horizontal. Cada reactor está diseñado para que la entrada y salida de la materia se localice en cada lado de la pared. La pared fuerza a la materia orgánica a seguir un flujo circular de modo que se extiende en toda la superficie de los reactores.

La mezcla del material orgánico se introduce mediante un sistema neumático, específicamente diseñado para un alto contenido de sólidos (20-30% de sólidos totales), por lo que se trata de un sistema seco. El biogás se inyecta a alta presión por el fondo del reactor de forma periódica y automatizada, lo que permite un mezclado vertical muy eficiente. Este original sistema de mezclado evita el uso de dispositivos mecánicos y al mismo tiempo, permite que el proceso opere con un alto contenido de sólidos facilitando la circulación y la transferencia de materia.

Las características del proceso de Valorga® son esencialmente (California Integrated Waste Management Board, 2008):

- Es un sistema seco (de 20 a 30% de contenido de sólidos).
- La homogeneización se lleva a cabo mediante la recirculación de biogás a alta presión que permite la degradación óptima del sustrato y evita la separación de fases dentro de los reactores.

³⁸ Demanda química de oxígeno por sus siglas en inglés Chemical Oxygen Demand (COD).

- La ausencia de cualquier dispositivo mecánico dentro de los digestores garantiza la completa disponibilidad y confiabilidad del proceso.
- El diseño especial de los digestores permite un flujo circular del sustrato, lo cual garantiza una degradación perfecta y regular de la materia orgánica mientras también se eliminan patógenos.
- El proceso se puede aplicar para residuos separados en fuente o para aquellos mecánicamente separados.

En cuestión de experiencia Valorga International cuenta con 27 plantas operando, la mayoría en Europa, con capacidades que van desde 28,000 t/año hasta las 497,000 t/año. Valorga International es una de las pocas empresas que más información proporcionan sobre la operación y control de sus plantas, por lo que se pudo ver que esta compañía trata en la mayoría de sus plantas mezclas de diferentes tipos de residuos orgánicos, como son fracciones orgánicas de RSU mezclados, restos de animales, residuos orgánicos domiciliarios, entre otros. La empresa informa cuáles son los porcentajes de sólidos que requiere su proceso, los volúmenes de sus reactores y la producción de biogás estimada, así como cantidad de electricidad que se puede obtener (Ver Tabla 8-12).

Toda la información proporcionada por Valorga en su sitio web da la impresión de una amplia experiencia y un buen control de proceso, por lo que es razonable que cuente con plantas de grandes capacidades operando en el mundo. Su planta más grande se encuentra en Fos sur Mer, Francia, con capacidad de 497,600 t/año, tratando residuos sólidos orgánicos, RSU y fracción separada mecánicamente de los RSU. El número y tamaño de los reactores que tiene esta planta es de los más bajos aún cuando la capacidad es de las más altas reportadas entre los diferentes proveedores de tecnología.

Sin embargo, cabe mencionar que para tratamiento de únicamente residuos orgánicos separados en fuente Valorga sólo reporta 2 plantas, la primera instalada en 1998 en Engelskirchen, Alemania, con capacidad de 35,000 t/año y la segunda en Calais, Francia, instalada en 2007 con capacidad de 28,000 t/año. Ambas plantas son de baja capacidad y son las únicas que sólo tratan residuos orgánicos separados en fuente pero que incluyen restos de animales, plantas, grasas y aceites (Valorga International, 2011).

Waasa®

El sistema Waasa® fue desarrollado en Waasa, Finlandia en 1989 y es uno de los pocos sistemas húmedos que se encontraron en el mercado y que ha sido utilizado en diferentes partes del mundo. El sistema consiste en un pulper vertical que homogeniza la materia orgánica, remueve partículas flotantes de la superficie y precipita las arenas del fondo del pulper. Después, el material orgánico es bombeado a una pre-cámara de agitación continua o tanque reactor.

La pre-cámara ayuda a disminuir riesgo de corto circuito y un lúpulo de inoculación asegura que el material a digerir sea expuesto a microorganismos, con el fin de minimizar la acidificación del medio y por tanto el desplome del sistema. Este tipo de proceso produce menor cantidad de biogás que el sistema seco y requiere reactores más grandes e incluso en mayor cantidad.

Hay reportes de que Waasa® cuenta con más de 10 plantas en el mundo, pero no se encontró mayor información al respecto, sólo que su planta más grande se localiza en Groningen, Holanda, con capacidad para tratar 92,000 t/año de fracción orgánica separada mecánicamente de los RSU. Este sistema produce

entre 0.10-0.15 m³ de biogás por cada kilogramo de residuo orgánico húmedo separado en fuente, reduciendo el peso entre 50 y 60 % (California Integrated Waste Management Board, 2008).

8.4.4 Proveedores con experiencia en tecnologías de gasificación

Como se pudo observar en la Tabla 8-13, las plantas de gasificación de RSU ya instaladas y actualmente en operación se encuentran en su mayoría en Europa, sin embargo, como ya se mencionó, en Estados Unidos y Canadá ya hay dos operando y se están instalando otras más a escala comercial como es el caso de la planta de Edmonton, Alberta (Canadá) y la de Pontotoc, Mississippi (Estados Unidos). Dichas plantas de Enerkem® se colocarán por capacidad (aproximadamente 330 t/d cada una) en quinto lugar a nivel mundial después de la de Nagasaki de Thermoselect® (612 t/d), la de Akita de Nippon Steel® (440 t/d), la de Kawaguchi de Ebara® (420 t/d) y la de Chiba de Thermoselect® (350 t/d), todas en Japón.

Para saber más de cada uno de estos proveedores que ya cuentan con una experiencia de años en el tema de gasificación, se les solicitó información sobre sus diferentes proyectos y plantas en operación. Desafortunadamente, sólo se obtuvo información de parte de Thermoselect® y Enerkem®, pero afortunadamente son las dos empresas que cuentan actualmente con el mayor número de plantas más grandes de gasificación.

A continuación se resumen las características generales de ambas tecnologías:

Thermoselect®

Es una compañía Suiza que generalmente combina pirólisis y gasificación, ofreciendo alto grado de sofisticación, reprocesamiento de casi todos los residuos y emisiones bajo estándar. Thermoselect® tiene operando plantas de gasificación desde 1999, cuando comenzó con la planta de Karlsruhe, Alemania, la cual comenzó operación de forma comercial hasta el 2003.

La tecnología de Thermoselect® es siempre de las que presentan un precio más alto, pero también se presume como la más limpia y avanzada de las tecnologías de tratamiento térmico, por lo que también es más compleja en estructura y difícil de controlar.

El proceso consiste en que los residuos son compactados para remover agua superficial y aire atrapado antes de pasar a la cámara de secado. Los residuos no requieren ningún tipo de separación previa. Posteriormente, los residuos pasan de la cámara de secado al gasificador de alta temperatura (1,300°C), el cual usa oxígeno como agente gasificante. La materia inorgánica y la carbonosa que no se volatilizó se convierten en “slag” o escoria. El syngas pasa por un enfriador y se limpia usando métodos de lavado húmedo. Por último, el syngas se quema para generar vapor o sólo se utiliza en motores de gas.

Los residuos que genera son escoria granulada que se puede vender o reusar (aunque no se especifica en qué se podría utilizar). También se reporta que sulfuros, sales y metales pesados son recolectados en bolsas para su venta. Además el sistema incluye tratamiento de aguas residuales, con lo cual se reutiliza el agua del proceso.

Enerkem®

Es una compañía Canadiense con sede en Québec que ofrece tecnología de gasificación que incluye el secado, separación y trituración de los residuos.

La preparación de los residuos es un poco más compleja ya que se requiere de diferentes tratamientos, como separación previa, recuperación de metales, plásticos, papel y vidrio, trituración, pelletizado o incluso desmenuzado de los RSU hasta formar una pelusa para poder alimentar el gasificador.

Una vez preparada la alimentación, pasa a un gasificador de lecho fluidizado produciendo syngas que debe pasar por una serie de pasos de limpieza. Entre ellos se pueden mencionar ciclones, enfriamiento del gas, lavados y filtros. El poder calorífico del syngas que se obtiene puede ser de entre 6 y 12 MJ/Nm³ dependiendo del proceso de gasificación.

El syngas limpio puede usarse en motores para generar energía eléctrica a bajos costos o alternativamente se puede introducir a reactores catalíticos que lo convierten en combustible líquido, incluyendo etanol de segunda generación, biocombustibles y/u otros productos químicos.

La tecnología de Enerkem®, si bien es menos cara y compleja que la de Thermosteact®, también genera más residuos que disponer. Los residuos se generan de diferentes equipos del proceso como son: carbón del gasificador, ceniza de los ciclones, lodos deshidratados de la planta de tratamiento de aguas residuales. Dichos residuos se pueden recolectar en un contenedor y enviarse a disposición final o a estabilización para su posterior uso en suelo (si no son peligrosos). Por otra parte, también se genera carbón activado gastado que se puede enviar a estabilización o se puede regresar al gasificador.

Las emisiones principales incluyen CO₂ y NO_x, así como trazas de metano, HCl, hidrocarburos, SO₂ y CO. El mercurio, cadmio, plomo, amonio, dioxinas y furanos se emiten en cantidades muy bajas y por debajo de los límites establecidos por Estados Unidos y Canadá. El amonio es una de las emisiones que deben controlarse. El amoniaco puede venderse o ser reintroducido al gasificador para que se convierta en N₂ y H₂. En general, se logra un estado estable de emisión de amoniaco y las demás emisiones se encuentran por debajo de los límites máximos.

En cuanto a la planta de tratamiento de aguas residuales, ésta produce efluente de calidad que puede ser reutilizado en el sistema.

Como ya se mencionó anteriormente Enerkem® ya cuenta con dos instalaciones operando: una planta piloto en Sherbrooke, Québec, otra planta piloto demostrativa en Westbrook, Québec y otra en Edmonton, Alberta, las tres en Canadá. Además, tiene una instalación a gran escala que ha operado sin problemas en Castellón, España desde el 2003.

Desde el año 2011 comenzaron la construcción de sus dos primeras plantas comerciales a gran escala, una en Pontotoc, Mississippi, Estados Unidos y la otra en Edmonton, Alberta, Canadá, las cuales entrarán en operación a mediados del 2012 con una capacidad aproximadas de 330 t/d cada una.

La planta comercial demostrativa de Enerkem® con capacidad para 39 t/d de RSU, ha estado en operación desde el 2009. La demostración a escala comercial significa que la instalación está en una

última etapa de desarrollo de la tecnología, haciendo pruebas todavía con lotes pequeños a modo de afinar el proceso.

8.5 La Postura del GDF con respecto a tecnologías como la Gasificación y Digestión Anaerobia

Para la implantación de nuevas tecnologías es de suma importancia revisar la postura del gobierno local al respecto, por lo cual, en este apartado se describen los puntos en los que tanto digestión anaerobia como gasificación cubrirían las necesidades que el GDF ha establecido en sus leyes, planes y programas.

8.5.1 Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal.

Esta ley tiene entre sus objetivos el planear el desarrollo urbano de la Ciudad de México con base en proyecciones de su crecimiento poblacional, a fin de garantizar la sustentabilidad de la ciudad, por lo que ve por infraestructura urbana, de servicios públicos, considera la instalación de sistemas de ahorro de energía y el aprovechamiento de energías renovables, entre otras cosas.

8.5.2 Programa General de Desarrollo del Distrito Federal 2007-2012.

Pretende enfrentar los retos de la Ciudad de México con soluciones integrales. Dos de sus siete ejes principales tienen que ver con el desarrollo urbano sustentable y de largo plazo y con el uso e implementación de servicios eficientes, así como calidad de vida para todos.

Como objetivos en materia de residuos sólidos, se encuentran:

- Manejar los residuos sólidos con una visión metropolitana.
- Consolidar un sistema de gestión de los residuos sólidos moderno en cada una de sus etapas, con altos niveles de eficiencia en la prestación del servicio y bajo impacto ecológico
- Tener un sistema de tratamiento de los residuos sólidos que emplee lo mejor de la tecnología y las experiencias internacionales.
- Solucionar el problema de sobrecarga del relleno sanitario y establecer alternativas.
- Capturar el biogás que se genera en el Bordo Poniente a través de un proyecto que cumpla con los lineamientos del Mecanismo de Desarrollo Limpio para la venta de bonos de carbono (GDF, 2007).

8.5.3 Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Distrito Federal (GDF, 2010).

En este programa, uno de los puntos principales a cubrir, es la búsqueda de tecnologías alternativas de tratamiento y valorización de residuos sólidos, incluyendo en cada investigación la interdisciplinariedad que considere otros componentes tales como los aspectos sociales, económicos y ambientales inherentes a la gestión integral de los residuos sólidos de la Ciudad de México.

Entre los objetivos de este programa se encuentran los siguientes:

- Instalación de Centros Integrales de Reciclaje y Energía (CIRE), reduciendo la generación de RSU y aprovechando los residuos en su totalidad, si es posible, generando energía.

- Aprovechamiento de residuos orgánicos encaminado a la generación de energía por vía del biogás, con producción de composta de calidad y en cantidad tal para aprovecharse para fines de mejoramiento de suelos.
- Diseño e implementación de CIREs como parques industriales ecológicos, donde, a partir de la recepción de RSU, se acondicionaría una planta de selección de inorgánicos, de cuyos materiales de rechazo se alimentarían las instalaciones de acopio y procesamiento. El sitio se abastecería de energía producida en las mismas instalaciones.
- Diseñar e implementar dentro del CIRE, una planta procesadora de orgánicos ya sea de compostaje o de digestores para la producción de biogás y composta, aprovechando el metano contenido del biogás para generar electricidad y composta de calidad como mejorador de suelo.
- Analizar la posibilidad de promover en la Central de Abasto, la utilización del proceso de digestión, para aprovechar y valorizar los residuos orgánicos.
- Identificar los residuos inorgánicos que puedan ser aprovechables para eliminarlos de la cadena tradicional de residuos que se disponen en rellenos sanitarios.
- Procesar el 100% de los residuos inorgánicos no reciclables generados en el D.F. a través de procesos térmicos.
- Obtener productos comercializables como gas de síntesis, bio-carbón o calor.
- Enviar a disposición final la cantidad mínima posible de ceniza residual.

8.6 Dimensionamiento de la propuesta

El dimensionamiento de la propuesta se realizó con base en la investigación mostrada en todos los capítulos anteriores. Finalmente, se consideraron los siguientes criterios para emitir una propuesta final:

- a) Área disponible en Bordo Poniente para plantas de tratamiento de residuos sólidos.
- b) Tamaño de la demanda de servicios de tratamiento y/o disposición de residuos sólidos en el DF.
- c) Suministros e insumos.
- d) Tecnologías y equipos.
- e) Costos.

A continuación se describe cada uno de los criterios evaluados:

8.6.1 Área disponible en Bordo Poniente

Se propone que la planta de RSU con generación de energía para el Distrito Federal se ubique en Bordo Poniente considerando que, si bien, éste ya dejó de fungir como relleno sanitario, cuenta con infraestructura en funcionamiento como la planta de compostaje, la planta de lixiviados y la planta de selección de materiales reciclables. Además, se estima que tan sólo la cuarta etapa del Bordo Poniente, recientemente cerrada, contiene más de 79 millones de toneladas de RSU (EPA, 2009), por lo que se está evaluando la posibilidad de capturar el biogás en dicha etapa para su posterior aprovechamiento en la generación de energía eléctrica. Aunado a todo lo anterior, la instalación de tecnologías de tratamiento de RSU en este sitio, podría resultar en un centro de tratamiento integral de RSU, con mejores ganancias y menores impactos ambientales y sociales.

El área seleccionada para el proyecto pertenece al predio de propiedad federal y bajo administración de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que mediante convenio respectivo, autorizó la utilización de 1000 Ha (área total de Bordo Poniente) para la disposición final de RSU generados en la zona metropolitana de la Ciudad de México.

Desde que se planeó y construyó la Etapa IV de Bordo Poniente, se consideró un área disponible para futuras plantas de tratamiento de RSU, ubicada al norte de esta Etapa IV. Se destinó esa área para dicho fin debido a que consta de terrenos no utilizados anteriormente para tiro de RSU y que además se encuentran retirados de la mancha urbana.

Por lo anterior y con base en visitas de campo al sitio, se propone, usar un área que consta de aproximadamente 30 hectáreas no utilizadas anteriormente como zona de tiro. Dicha zona se encuentra limitada por la etapa IV de Bordo Poniente en sus costados poniente, oriente y sur y por la parte norte se encuentra limitada por el brazo izquierdo del Río Churubusco, como se puede ver en la Figura 8-4.



Figura 8-4 Ubicación del área propuesta en Bordo Poniente

En este trabajo no se realizaron los estudios de suelo del sitio, sin embargo, se tomaron como referencia los que realizó la Secretaría de Obras y Servicios mediante su Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) en su ejercicio 2005, bajo el nombre de “Estudio de Impacto Ambiental del Sistema Integral de Manejo de Desechos Sólidos” (SOS, 2005). También se revisaron los estudios realizados por la misma

dependencia previos a la construcción de la Etapa IV del relleno sanitario, los cuales se titulan “Diseño de un relleno sanitario en el sitio denominado Bordo Poniente” (SOS, 1993).

A continuación se describen los criterios que recomienda el “Manual para la operación de rellenos sanitarios” (SEDESOL, 1998),³⁹ emitido por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) para la identificación de un sitio factible para la instalación de un relleno sanitario.

El Bordo Poniente comprende parte de la Sierra de Guadalupe, el Ex – Lago de Texcoco y el cerro Chimalihuache. La zona en general es una planicie de estratos arcillosos intercalados con material lacustre, alcanza espesores de más de 180 metros y tiene una permeabilidad baja.

El Ex – Lago de Texcoco cuenta con una Capa Superior o Manto Superficial (CS), una Formación Arcillosa Superior (FAS), una Capa Dura (CD), una Formación Arcillosa Inferior (FAI) y una zona de Depósitos Profundos (DP) que se describen en la tabla siguiente.

39 Se utilizó como guía el Manual para la operación de rellenos sanitarios de la SEDESOL debido a que no existe una para la instalación de tecnologías de tratamiento de RSU.

Tabla 8-14 Características del sitio en Bordo Poniente

Tipo	Subtipo	Descripción
Geología	Capa Superior o Manto Superficial (CS)	Formada por arcillas afectadas por secado, limo arcillosas y arenas limosas. Su espesor aproximado es de 1.5 metros, aumentando hacia la Sierra de Guadalupe; estos materiales están surcados por grietas rellenas con materiales eólicos, principalmente en las zonas cercanas a Bordo de Socias, en la intersección de Bordo Poniente con el camino Peñón-Texcoco y en la zona del aeropuerto. Esta capa descansa sobre la formación arcillosa superior.
Geología	Formación Arcillosa Superior (FAS)	Construida por arcillas blandas altamente plásticas, con espesores variables de acuerdo con el lugar; 18 metros en la zona de El Caracol; 40 metros en el Bordo de Socias; 6 metros en la cercanía de la Sierra de Guadalupe; 25 m en la zona centro de la Ciudad de México, de 39 a 17 m en el tramo comprendido del km. 3 al 13 del camino Peñón-Texcoco. Las arcillas que componen esta unidad son de origen volcánico lacustre, con intercalaciones y lentes de arena, limos y de vidrio volcánico. Sobreyace a la llamada capa dura.
Geología	Capa Dura (CD)	Compuesta de materiales limo-arenosos cementados por carbonato de calcio y con rasgos de desecación; presenta un espesor variable de entre 2.0 y 3.5 metros, tendiendo a desaparecer hacia el oriente, en las inmediaciones de Ciudad Nezahualcóyotl. Se encuentra a una profundidad de entre 36 y 38 metros.
Geología	Formación Arcillosa Inferior (FAI)	Conocida también como capa arcillo-arenosa, son una serie de estratos de arcilla de elevada plasticidad con lentes y estratos limo-arenosos y de vidrio volcánico; es diferente de la Formación Arcillosa Superior únicamente por su menor contenido de agua. Su espesor medio en el centro del lago es de 20 metros, disminuyendo hacia el oriente y al norte. Esta formación tiende a desaparecer en la Sierra de Guadalupe.
Geología	Paquete arcilloso	Con un espesor promedio de entre 80 y 90 metros. Ubicado justo debajo de la zona donde se ubica el relleno sanitario.
Geología	Depósitos Profundos (DP)	Construidos por limos compactos, gravas y arcillas menos plásticas que las de la Formación Arcillosa Superior. Los materiales están interestratificados con capas de arenas finas y lentes de material volcánico y aluvial. Los espesores no se definen, ya que esta formación se profundiza en el subsuelo. Los depósitos profundos son también conocidos como “segunda capa dura” y se dice que existe una tercera formación arcillosa dentro de los depósitos profundos, con un espesor de más de 6 metros y a profundidades de más de 53 metros. Después existe una cuarta formación arcillosa o de depósitos profundos interiores conformados por un conjunto de estratos arenosos, limosos y limo-arenosos que en ocasiones contienen arcilla y gravas; se encuentran a profundidades de entre 145 y 160 metros.
Geología	Paquete de material limo-arenoso	Se encuentra a una profundidad variable de entre 38 y 42 metros. Tiene una mayor compactación y un espesor aproximado de 1.50 metros considerado como la primera capa dura.

Tabla 8-14 Características del sitio en Bordo Poniente (Continúa...)

Tipo	Descripción
Hidrografía	El comportamiento hidrogeológico de los sedimentos lacustres es muy variado, existiendo potentes espesores de material con muy baja permeabilidad que pueden ser clasificados como acuitardos, alternando con otros de mayor permeabilidad que conforman acuíferos y acuitardos, saturados con agua de mala a muy mala calidad química.
Geohidrología	Sistema de sedimentos lacustres con comportamiento variado, existiendo potentes espesores de material con muy baja permeabilidad que pueden ser clasificados como acuitardos, alternando con otros de mayor permeabilidad que conforman acuíferos y acuitardos, saturados con agua de mala a muy mala calidad química.
Capacidad de carga	Para que la arcilla del subsuelo no presente una velocidad de deformación excesiva que conlleve un riesgo de falla por flujo plástico, es recomendable que se edifique en dos etapas, la primera, en la que se transmita una presión máxima de 2.5 t/m ² y una segunda etapa con la que se alcancen hasta 5 t/m ² , pudiendo alcanzar una carga total de 9 t/m ² .
Susceptibilidad de inundación	Existe hundimiento regional que hace perder capacidad de conducción a los canales y dren general hacia el Gran Canal, por lo que es probable que la zona sea inundable conforme pase el tiempo. La cuarta etapa de Bordo Poniente se ubica a unos 2 km al noreste de la descarga de la estación de bombeo, por lo que podría ser sometida a inundaciones bajo tormentas extraordinarias de la zona metropolitana o por incapacidad hidráulica de las conducciones dentro del lago en un plazo relativamente breve.
Sismicidad	<p>El sitio se encuentra en las fallas 7, 8 y 9 fallas, las cuales se localizan a profundidad en las zonas lacustres de la Ciudad de México y de Texcoco, afectan solamente a las calizas plegadas del cretáceo y formaciones volcánicas del oligoceno y se encuentran inactivas desde hace 15 millones de años, sin manifestaciones superficiales en la zona baja del Valle.</p> <p>En la cuenca sólo se consideran ligeramente activas la falla de Contreras en el suroeste y la falla de Santa Catarina en la Sierra del mismo nombre, muy alejadas de la zona de interés. No existe evidencia de que durante los sismos de 1985, estas fallas hayan influenciado el comportamiento dinámico de las zonas con mayores daños en la zona conurbada.</p>

Fuente: (SOS, 1993; SOS, 2005; SIMAT, 2009; SIMAT, 2010).

Tabla 8-14 Características del sitio en Bordo Poniente (Continúa)

Tipo	Descripción
Zona de amortiguamiento	<p>Existe una franja de protección de los canales actuales (Canal del brazo izquierdo y derecho del Río Churubusco y Canal del dren general del Valle de México) de mínimo 100 metros de distancia.</p> <p>Hay una distancia de más de 200 metros a la carretera a la carretera Peñón- Texcoco. El área total de amortiguamiento asciende a 92 hectáreas.</p>
Vías de comunicación	<p>Con el Distrito Federal por la Avenida 608 hasta la Avenida Central, tomando la Avenida Taxímetros en dirección hacia Ciudad Nezahualcóyotl, se llega en cinco minutos al acceso de la Zona Federal.</p> <p>Con el municipio de Ecatepec por la Avenida Central en dirección al sur, hasta la Avenida Taxímetros y por ésta, al acceso a la Zona Federal. Con las zonas centro, sur y oriente de Ciudad Nezahualcóyotl por la Avenida Xochiaca hasta Avenida Taxímetros.</p> <p>En el interior de Bordo Poniente se pueden usar los accesos utilizados para la cuarta etapa, que son por el Camino Peñón Texcoco, acceso sur y por la Avenida Río de los Remedios o el mismo utilizado para la planta de selección y planta de lixiviados.</p>
Situación legal del suelo	<p>La zona del ex Lago de Texcoco es una zona federal que pertenece a la CONAGUA⁴⁰ y que fue cedida mediante convenio para su uso para tratamiento y disposición final de RSU del Distrito Federal.</p>
Servicios	<p>Fuente de Suministro de agua potable: 100 m³, línea de construcción existente en el camino Peñón Texcoco.</p> <p>Fuente de suministro de energía eléctrica: Red de electricidad de la Comisión Federal de Electricidad.</p>

⁴⁰ CONAGUA son las siglas de la Comisión Nacional del Agua.

Tabla 8-15 Meteorología de Bordo Poniente.

Tipo	Subtipo	Descripción
Meteorología	Temperatura promedio	17.5 °C
	Temperatura máxima extrema	27-33°C
	Temperatura mínima extrema	5°C
	Precipitación pluvial	28-33 mm
	Humedad relativa	60%
	Dirección de los vientos	Principalmente dirección Norte y Noroeste
	Presión atmosférica	782 milibares
	Elevación sobre el nivel del mar	2,230 msnm

Fuente: (SOS, 1993; SOS, 2005; SIMAT, 2009; SIMAT, 2010).

A continuación se presentan fotografías de la ubicación y colindancias del sitio con la planta de selección, la cuarta etapa de Bordo Poniente y la planta de compostaje.

En la Fotografía 8-1 se puede ver parte del terreno disponible y a lo lejos, la colindancia con la planta de selección actual de Bordo Poniente.



Fotografía 8-1 Colindancia con la planta de selección

En la Fotografía 8-2 se observa parte de la planta de compostaje y al fondo, la Etapa IV del relleno sanitario de Bordo Poniente.



Fotografía 8-2 Colindancia con la planta de compostaje

En la Fotografía 8-3 se puede observar otro ángulo del terreno disponible, así como el tipo de suelo que presenta.



Fotografía 8-3 Terreno disponible y tipo de suelo

Si el sistema se estableciera en este sitio, se cumpliría con las restricciones a considerar para la ubicación del digestor y el gasificador, entre las que se encuentran:

- a) No se encuentra ubicado cerca de aeródromos de servicio público o aeropuertos.
- b) No se encuentra ubicado dentro de áreas naturales protegidas.
- c) Se encuentra a una distancia de mínimo 500 m de cualquier núcleo poblacional.
- d) No se ubica cerca de zonas de marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, zonas arqueológicas, fracturas o fallas geológicas.
- e) La distancia con respecto a cuerpos de aguas superficiales con caudal mínimo, lagos y lagunas, cumple con ser de más de 500 metros.
- f) Se ubican fuera de zonas de inundación.
- g) El límite del sistema y cualquier pozo de extracción de agua se encuentran a más de 500 metros de distancia.

8.6.2 Tamaño de la demanda de servicios de tratamiento y/o disposición de residuos sólidos en el D.F.

De acuerdo a los últimos reportes oficiales del Distrito Federal, se generan aproximadamente 12,646 t/d de RSU, de los cuales en los últimos meses se ha alcanzado a tratar cerca de 1,216 t/d mediante compostaje, lo que corresponde a un 17.3% de la generación total de residuos orgánicos. El 82.7% restante de los residuos orgánicos generados (5,813 t/d) continúan sin pasar por ningún tipo de tratamiento.

Por otra parte, la planta de compostaje de Bordo Poniente, una de las pocas plantas de este tipo que funciona actualmente, ha incrementado su capacidad de tratamiento, recibiendo residuos principalmente de la CEDA, la estación de transferencia Iztapalapa I, delegación Benito Juárez, servicios de poda y domiciliaria separada (López, 2010), por lo que la cantidad de residuos orgánicos a tratar debe contemplar también este flujo de residuos hacia la planta de composta para no interferir en la operación actual, recién mejorada de dicha planta. En los meses de Julio y Agosto del 2011 la planta empezó a recibir 1,200 t/d de residuos orgánicos separados debido al programa de separación en la Ciudad de México. Y se planea que a muy corto o mediano plazo alcanzará las 2,000 t/d y posteriormente las 3,000 t/d, lo cual ayudará a cubrir la demanda de tratamiento de residuos orgánicos en caso de que se siga llevando a cabo el programa de separación de residuos de forma correcta y permanente.

En el caso de los 5,617 t/d de RSU mezclados o denominados “inorgánicos” de acuerdo al Programa de separación del GDF, no pasan por ningún tipo de tratamiento y se envían directamente a disposición final. Lo que significa que la demanda de tratamientos o alternativas de disposición de residuos sólidos en este momento es muy alta y difícilmente una sola tecnología podría tratar esas cantidades de residuos generados por día. Sin embargo, se puede empezar a evaluar diferentes tecnologías a escalas piloto y posteriormente ir escalando la capacidad al mismo tiempo que se trabaja en nuevas políticas que fomenten y obliguen a consumidores y productores a reducir la generación diaria de residuos.

8.6.3 Suministros e insumos.

Los suministros principales que requieren las tecnologías de digestión anaerobia y gasificación son: gas natural, electricidad y agua.

En cuanto a insumos es variable de acuerdo al subtipo específico de cada tecnología que se elija, pero entre ellos se pueden mencionar los típicos para limpieza de gases generados por gasificación, como son: ácido clorhídrico, hidróxido de sodio, cal, agua, glicerina, carbón activado, aditivos y catalizadores.

Como se puede observar no se requiere de suministros o insumos difíciles de conseguir o de costo muy elevado, por lo que este rubro tampoco representa ningún problema para la implementación de las tecnologías.

8.6.4 Tecnologías y equipos.

En el caso de esta propuesta, la limitante reside principalmente en las tecnologías a utilizar, ya que por los resultados de investigación, tanto la gasificación como la digestión anaerobia tienen capacidades a nivel comercial, relativamente pequeñas en comparación con la cantidad de RSU que se envían a relleno sanitario diariamente en el D.F. A pesar de esta limitante, los proveedores de ambas tecnologías ofrecen siempre sistemas modulares con lo que podrían tratarse todos los RSU del D.F., pero en ese caso, las limitantes serían los costos, la disponibilidad de la superficie requerida e incluso el financiamiento, ya que ambas son tecnologías que representan altas inversiones.

Por otro lado, siempre que se instala una nueva tecnología, es conveniente empezar con escalas piloto, que permitan hacer pruebas y optimizar *in situ* el proceso, así, una vez probado y bien controlado, se puede escalar con menor riesgo el tamaño hasta cubrir totalmente (de ser posible) la demanda total de tratamiento.

Equipos principales para un proceso de digestión anaerobia de residuos orgánicos separados.

De acuerdo a los pretratamientos, tratamientos y post-tratamientos investigados que ya se desarrollan internacionalmente para RSU, se considera que un tratamiento para el tipo de residuos orgánicos que se podrían tratar del D.F. incluiría al menos lo siguiente:

1. Un módulo de pretratamiento, en el cual se prepara la corriente de entrada para que cumpla con los parámetros requeridos, como son contenido de materia seca, temperatura, pH, relación C/N y tamaño de partícula, antes de entrar al digestor.
2. Uno o varios digestores con agitadores internos (agitadores) o agitación externa (circulación del biogás producido). El contenido de sólidos para este caso se consideró de 10% de sólidos totales ST, por tratarse de un sistema húmedo, de acuerdo a las características de los residuos de la CEDA.
3. Sistema de tratamiento de gas, la cual se compone de:
 - a) Dispositivos de limpieza del biogás, cuya principal tarea es remover el contenido de ácido sulfhídrico y la humedad del biogás que ingresará a los motores de combustión interna (MCI).
 - b) Dispositivos para la generación de energía a partir de biogás, se trata de MCI modificados, operados en el modo de cogeneración.

- c) Flamas de gas que se utilizan como dispositivos de emergencia que incineran los excesos de biogás en caso de que un MCI quede fuera de servicio por algún motivo.
4. Sistema de tratamiento de sólidos, para tratar la biomasa digerida (opcional pero recomendada), la cual consta de:
- a) Un separador por decantación que separa la fracción fibrosa (con un contenido de ST de aproximadamente 35%) de la fracción líquida (con un contenido de ST de aproximadamente 2.5%).
 - b) Tratamiento de la fracción líquida, generalmente constituida por un evaporador (que también utiliza energía térmica/calor residual proveniente de los MCI). En algunos casos, la fracción líquida puede ser utilizada directamente para irrigación (Karellas, 2010).

Considerando todo este tren de tratamiento, RIS International (2005) reporta una forma sencilla para estimar el área aproximada de la planta de digestión anaerobia con base en estadísticas de las plantas del mundo. RIS International menciona que se puede considerar 91 m² por el tonelaje a tratar por día (RIS International, 2005).

Equipos principales para un proceso de gasificación de residuos mezclados previamente separados de la materia orgánica.

1. Un sistema de pretratamiento que consiste en una serie de pasos para la preparación de los residuos que se alimentarán al gasificador. El pretratamiento consiste en:
 - a) Una tolva de alimentación en la que se vierten los residuos previamente separados desde la fuente y a los que se les ha retirado la mayor parte de los materiales reciclables que pudieron haber contenido.
 - b) Un trómel que rasga las bolsas y separa los residuos orgánicos o de tamaño fino, segrega los más grandes y los alimenta a las bandas de separación manual.
 - c) Bandas de separación manual, en las que se recuperan manualmente los materiales reciclables que aún puedan recuperarse.
 - d) Separador Eddy-Current, en el que se separan materiales metálicos tanto ferrosos como no ferrosos.
 - e) Triturador, este equipo se usa para llegar al tamaño de partícula establecido por el proveedor (por lo general oscila entre los 5-8 cm) (EWMCE, 2011), alimentando el flujo de salida a una criba giratoria.
 - f) Criba giratoria, en la cual se separan las partículas cuyo tamaño aún excede el especificado, retornándose al triturador. Las partículas que ya cumplan con el tamaño deseado se alimentan al secador.
 - g) Secador, tiene la función de asegurar una humedad entre 15 – 20 % (RTI International, 2012) dependiendo del tipo de gasificación que se elija.

2. Un gasificador, que generalmente es de lecho fluidizado cuando se tratan RSU mezclados.
3. Un sistema de limpieza de gases que como mínimo debe considerar lo siguiente:
 - a) Un quench o enfriador de gases, el cual utiliza agua para bajar la temperatura de los gases y recircula el agua utilizada.
 - b) Un lavador de ácidos, el cual disuelve ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico, así como metales pesados en forma de cloruros o fluoruros.
 - c) Un lavador alcalino, el cual neutraliza dióxido de azufre, ácido fluorhídrico, ácido clorhídrico, sulfuro de carbonilo, amonio y ácido cianhídrico, entre otros.
 - d) Un removedor de partículas, como puede ser un filtro bolsa, ciclones o un filtro de carbón activado.
 - e) Un removedor de ácido sulfhídrico, el cual remueve finalmente el azufre y envía el syngas limpio a los motores de gas.
4. Un sistema de generación de energía eléctrica que consta de los siguientes elementos:
 - a) Motor de gas que se alimenta de syngas limpio.
 - b) Caldera de recuperación con removedor de nitratos, nitritos y monóxido de carbono de los gases de combustión.
 - c) Turbinas de vapor que serán alimentadas por el vapor generado por la caldera.
 - d) Condensador para recuperar el vapor utilizado en la turbina de vapor y enviarlo nuevamente a la caldera.

Una vez sabiendo cuáles son los equipos mínimos a considerar para un sistema de gasificación y siguiendo las especificaciones que Enerkem® y Thermostelect® reportan para sus plantas más grandes de tratamiento de RSU. El área estimada para un tratamiento de aproximadamente 120,000 t/d oscila entre las 1.4 y 1.8 Ha (Juniper 2004; Energos, 2010) sólo para el sistema de pretratamiento y gasificación, para el sistema de limpieza de gases y generación de energía se recomienda considerar un área igual (1.8 Ha).

8.6.5 Costos

La estimación de costo capital y de operación se obtuvo mediante la recopilación de datos publicados, algunos proporcionados por los mismos proveedores y otros facilitados por personal a cargo de plantas ya instaladas o en construcción que amablemente compartieron dicha información.

En la mayoría de los casos, es complicado obtener una estimación exacta, debido a que las plantas con mayores capacidades de tratamiento (tanto de gasificación como de digestión anaerobia) no proporcionan datos sobre sus costos o se encuentran en una fase de transición de escala piloto o demostrativa a una escala comercial. Dicha transición proporciona datos variables, no escalables ni predecibles por ahora y se espera que con la estabilización del proceso, también los costos se vuelvan más consistentes.

Como ejemplo se pueden citar dos de las plantas de gasificación instaladas por Enerkem®, ambas con capacidad aproximada de 330 t/d pero con una marcada diferencia en costos. La de Edmonton, Alberta,

Canadá se reporta con un costo capital de \$1,271,689,969 (Chornet, 2009), mientras que la de Pontotoc, Mississippi, Estado Unidos se reporta en \$1,904,000,000 (RTI International, 2012).

Para el caso de las plantas de digestión anaerobia no se cuenta con datos publicados de costos de las plantas, además de que influyen un sinnúmero de factores que hacen la diferencia de costos entre una planta y otra. Por ejemplo, las plantas para tratar RSU son más caras que las que tratan excretas de granjas, así mismo influye la ubicación geográfica de la planta y el número de pre y post tratamientos que se le quiera dar a los residuos de entrada y de salida de la planta.

En un estudio de la California Environmental Protection Agency (2008) se reporta una serie de ecuaciones con las que se puede obtener una estimación de costos de plantas de digestión anaerobia de acuerdo a su capacidad (California Integrated Waste Management Board, 2008). Para plantas de 73,000 t/año (200 t/d) se estimó un costo de aproximadamente \$280,600,000 mientras que para una de 100,000 t/año (273 t/d) se estimó un costo de \$334,500,000. Si se hace una gráfica de los costos por capacidad, resultaría evidente que una planta de 273 t/d inicialmente conviene más que una de 200 t/d, sin embargo, el tamaño y control de una planta de más de 250 t/d es mucho más complicado de manejar y por tanto se corre un mayor riesgo técnico y económico. Es por eso que no existen tantas plantas que excedan esa capacidad, al menos en el caso de sistemas húmedos de digestión anaerobia.

8.7 Esquema de tratamiento de RSU propuesto

Con base en los 5 criterios antes descritos, el esquema de tratamiento de RSU en este primer módulo se propone para 540 t/d para Bordo Poniente como se muestra el diagrama en la Figura 8-5.

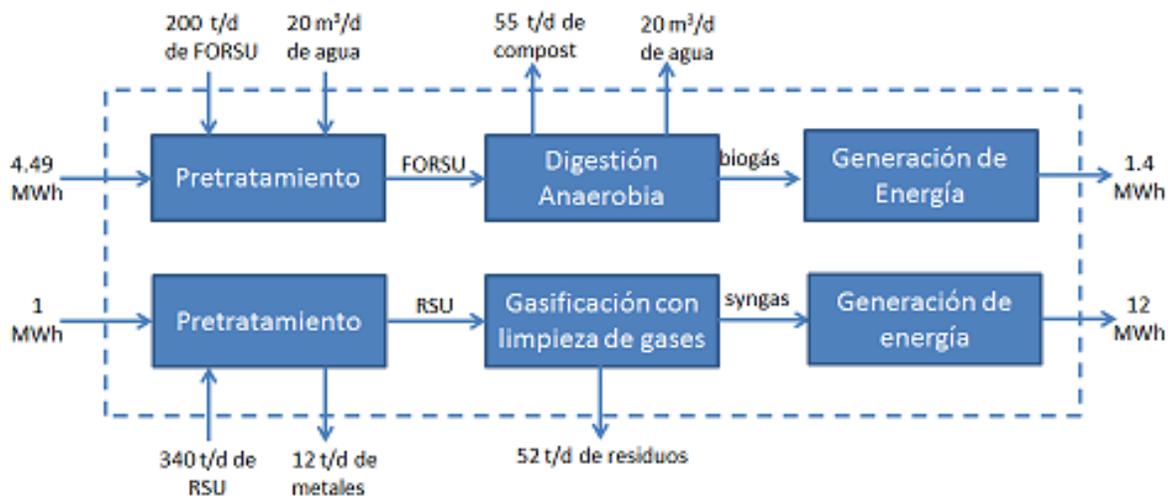


Figura 8-5 Diagrama de bloques del tratamiento de RSU propuesto

8.7.1 Descripción y consideraciones del esquema propuesto de digestión anaerobia para la fracción orgánica de RSU separada en fuente.

En este estudio se consideró a la fracción orgánica como los residuos de mercado, comida, poda y jardinería, dejando fuera del concepto a los residuos reciclables también de origen orgánico como el caso del papel, cartón y plásticos, debido a que estos últimos se están incluyendo en la fracción de materiales valorizables.

Desde el año 2004, se ha reportado por parte de la Secretaría de Obras y Servicios (SOS), que en la Central de Abasto (CEDA) se generan 450 t/día de residuos sólidos (FEMISCA, 2009). En el año 2008 la misma SOS realizó un estudio bromatológico⁴¹ de los residuos orgánicos de la CEDA y los resultados se muestran en la Tabla 8-16, con lo cual se puede tener una idea de la buena calidad de compost que se podría obtener de la digestión anaerobia de dichos residuos.

Tabla 8-16 Contenido bromatológico de los residuos orgánicos de la CEDA

Análisis	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Humedad (%)	86.13	92.34	90.02	88.16
Cenizas (%)	1.45	1.07	0.60	0.71
Proteína (%)	2.95	2.32	1.43	1.86
Grasa (%)	0.22	0.12	0.17	0.17
Fibra cruda (%)	2.16	1.45	0.80	0.90
Carbohidratos (%)	9.25	4.15	7.78	9.10
Fosfatos (%)	0.22	0.17	0.14	0.18
Calcio (mg/kg)	26.80	18.00	7.10	4.90
Xantófilas (mg/kg)	32.42	28.01	44.94	56.83
Cuenta total (UFC/g)	6.48×10^6	6.50×10^6	4.50×10^6	4.77×10^6
Cuentas coliformes (OC/g)	2.40×10^4	2.40×10^4	2.00×10^3	2.40×10^3
Hongos (UFC/g)	5.00×10^2	7.00×10^2	1.80×10^5	1.40×10^5
Levaduras (UFC/g)	8.10×10^6	8.46×10^6	1.68×10^6	2.00×10^6
Aflatoxinas (B ₁ Ug/kg)	26.00	53.00	<0.4	<0.4
Aflatoxinas (B ₂ Ug/kg)	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
Aflatoxinas (G ₁ Ug/kg)	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Aflatoxinas (G ₂ Ug/kg)	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3

Fuente: (FEMISCA, 2009)

Estos datos también sirven para las pruebas que se realicen, a modo de encontrar uno o varios sustratos que se puedan mezclar con los residuos de la CEDA y generen una mayor calidad y cantidad de biogás.

De acuerdo a las visitas realizadas a la CEDA en el 2009 y 2010, se verificó que efectivamente se generaban alrededor de 450 t/d de residuos orgánicos separados, provenientes principalmente del departamento de frutas y legumbres. Debido a que no se realizó un estudio de contenido de Sólidos Totales (ST) a los

41 Un estudio bromatológico es un análisis químico que analiza la materia desde un punto de vista físico, entre lo que se incluye higiene, toxicidad y química analítica. Datos que ayudan a predecir un poco más la calidad del digestato o compost.

residuos orgánicos de la CEDA, se consultaron los datos estándar establecidos por RETSCREEN International®⁴² para diferentes tipos de residuos. Para residuos de frutas y legumbres RETSCREEN International® reporta valores de 12.5% de ST. Después, con el % de ST obtenido se usaron las fórmulas y datos sugeridos por Díaz (2009) para estimar la cantidad de Sólidos Volátiles (SV), la de Sólidos Volátiles Biodegradables (SVB) y la cantidad de biogás producido (específicamente para digestión anaerobia de frutas y legumbres mexicanas), con lo que se obtuvieron los resultados que se resumen en la Tabla 8-17:

Tabla 8-17 Estimación de la composición de sólidos y producción de biogás de los residuos orgánicos separados de la CEDA

Tipo de Residuo	Cantidad (t/d)	Sólidos Totales (%)	Sólidos volátiles (t/d)	Sólidos Volátiles Biodegradables (t/d)	Eficiencia de conversión de SVB (%)	Producción de biogás (m ³ /t _{SVB})	Producción de biogás (m ³ /d)	Contenido de metano (%)
Frutas y legumbres	200	12.5	SV=(0.93)*ST=25	SVB=(0.7)*(SV)=17.5	95	812.5	13,508	63

Fuente: Elaboración propia a partir de Díaz (2009) y RETSCREEN International (2011).

El análisis de los resultados obtenidos en la Tabla 8-17 nos indica que la producción de biogás sería muy baja si solamente se utiliza este tipo de residuos, ya que suponiendo 20 horas al día, se generarían solamente alrededor de 1.4 MWh⁴³. Esto se debe a que no se cumple uno de los principios más importantes de la digestión anaerobia, la relación C/N, la cual se considera óptima cuando oscila entre 20:1 y 30:1.

De acuerdo a los estudios realizados por Díaz (2009), los residuos de frutas exceden la relación C/N por apenas 5 unidades (Díaz, 2009), es decir, tiene una relación de 35. Esta diferencia afecta el proceso y convierte al nitrógeno en el elemento limitante para que la digestión se lleve a cabo. Debido a ello, para que la digestión anaerobia de este tipo de residuos se optimice, se debe mezclar con otros residuos de C/N menor, como podría ser algún tipo de estiércol, residuos que además de ser rápidamente biodegradables, aportan microorganismos a la digestión anaerobia además de una mayor cantidad de nitrógeno a la mezcla.

El volumen del digestor debe ser capaz de permitir el manejo de la mezcla de sólidos que se introduzca, así como la cantidad de agua que se contenga en el digestor. La mayoría de los proveedores recomiendan que la mezcla ya diluida ocupe 2/3 del volumen total, considerando esto como un factor de seguridad que considera también la cantidad de biogás que se va generando y/o el que se inyecta para mezclar el contenido (esto depende de la configuración del sistema de mezclado del reactor).

Considerando el análisis de los 5 criterios descritos anteriormente, el marco teórico de cada tecnología y la experiencia de los distintos proveedores seleccionados por su amplia trayectoria en cada tema, se estableció el tamaño de la propuesta.

⁴² RETSCREEN International es un software de análisis de proyectos de energía limpia, desarrollado con la colaboración de importantes organizaciones gubernamentales y no gubernamentales entre los que destacan la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la UNEP (United Nations Environment Program) y el Fondo prototipo de carbono del Banco Mundial.

⁴³ Para ver como se realizaron los cálculos de generación de energía, consulte el Anexo I.

La cantidad de residuos orgánicos de la CEDA que se pueden separar sin afectar el crecimiento programado de la capacidad de la planta de compostaje de Bordo Poniente es de aproximadamente 450 t/d de residuos de frutas y legumbres. Sin embargo, los proveedores de tecnologías de digestión anaerobia no manejan en su mayoría capacidades tan grandes para un solo tipo de residuo. La planta más grande que trata residuos orgánicos del tipo de los de la CEDA trata 70,000 t/año. Hay otras plantas de capacidad mucho mayor pero que hacen co-digestión, es decir, mezcla de diferentes tipos de residuos.

Tratar solamente residuos de frutas y legumbres no resulta ser muy beneficioso, debido a que no contiene una óptima relación C/N, pero se llega a hacer en algunas plantas y para fines de este estudio se analizará la prefactibilidad de hacerlo con la capacidad máxima encontrada en su tipo, 200 t/d.

En la Figura 8-6 se muestra el esquema propuesto para el tratamiento de los residuos orgánicos con generación de energía eléctrica:

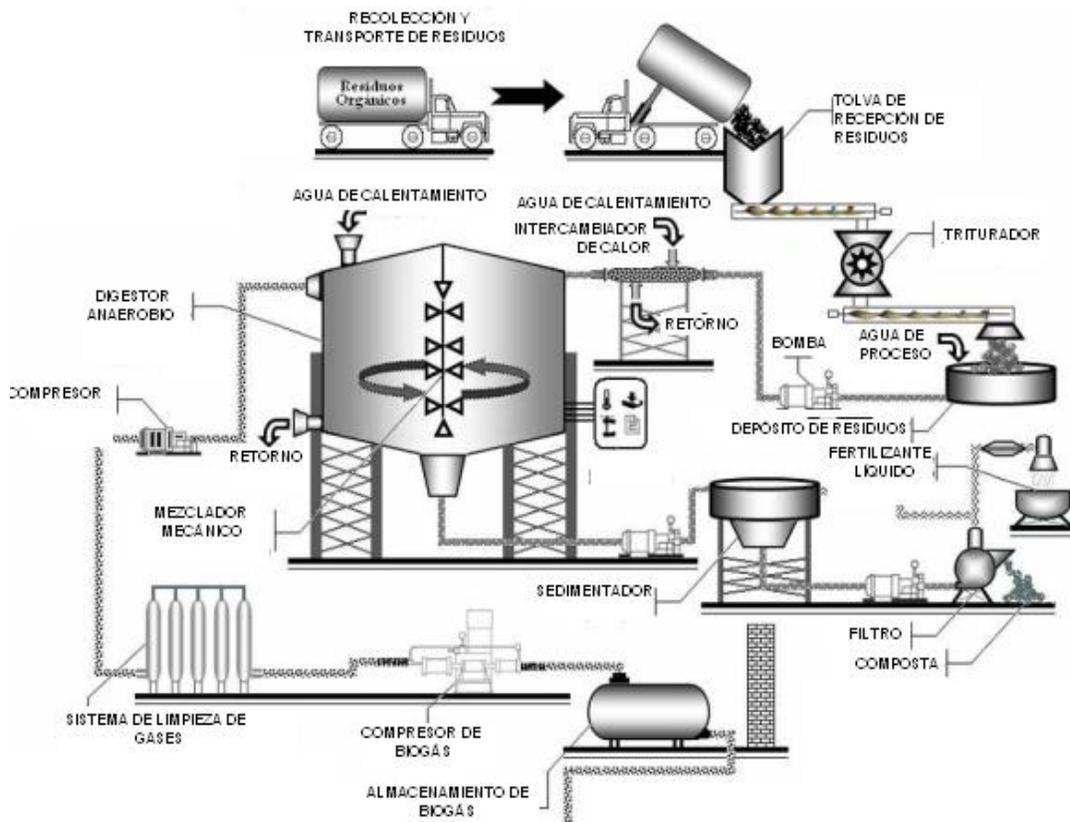


Figura 8-6 Esquema propuesto de digestión anaerobia para residuos orgánicos con generación de energía eléctrica.

8.7.2 Estimación del área requerida para el sistema de digestión anaerobia.

Retomando los datos proporcionados por RIS Internacional (2005) para estimar el área aproximada de una planta de digestión que considere todos equipos de pretratamiento, tratamiento y post-tratamiento así

como limpieza de gases y generación de energía, se consideraron 91 m² por cada tonelada por día a tratar (RIS International, 2005). Considerando que se tratarán 200 t/d se obtiene un resultado de 1.8 hectáreas requeridas.

8.7.3 Recursos Humanos requeridos para el sistema de digestión anaerobia.

Con base en lo descrito por Karellas (2010), quien realizó un estudio para un sistema de digestión anaerobia para residuos de características similares a los de la CEDA, se estimó el número y perfil de las personas necesarias para operar la planta de digestión anaerobia en 3 turnos (Karellas, 2010).

Tabla 8-18 Recursos Humanos requeridos para la planta de digestión anaerobia

Área de proceso	Número de personal por turno	Número de personal por día	Perfil	Puesto
Digestión Anaerobia	1	3	Ingeniero	Supervisor
	1	3	Operador	Operador de pretratamiento, digestor y limpieza de gases
	1	3	Operador	Operador de tratamiento de fracción sólida y fracción líquida
	1	3	Operador	Operador de generación de energía (térmica y eléctrica)
Total	4	12		

Fuente: Adaptado de Karellas (2010).

8.7.4 Descripción y consideraciones del esquema propuesto de gasificación para la fracción de materiales no recuperables.

La fracción de materiales no recuperables se refiere a la fracción después del pretratamiento, en su mayoría se espera que sean materiales que se considera que ya no pueden ser recuperados en buen estado, ni reciclados por el mismo motivo. Ahora que ya se lleva a cabo la separación de RSU en fuente, estos residuos no deberían contener materia orgánica, pero si la hubiera, ésta sería mínima y no afectaría el proceso de gasificación.

De acuerdo a la revisión de proveedores de tecnologías de gasificación, son muy pocas las plantas con capacidades mayores a las 350 t/d, siendo las más destacadas la de Nagasaki de Thermoselect® (612 t/d), la de Akita de Nippon Steel® (440 t/d), la de Kawaguchi de Ebara® (420 t/d) y la de Chiba de Thermoselect® (350 t/d), todas en Japón.

De Ebara® y de Nippon Steel® no se logró obtener mayor información sobre sus procesos, sólo algunos datos estimados encontrados en la literatura. En cuanto a Thermoselect®, si bien se encontró información suficiente, también se constató que el tipo de tratamiento que ofrece es una combinación de pirolisis y gasificación, una de las cosas que hace su proceso más complejo de lo que se estableció como alcance para este estudio además de que sus instalaciones se encarecen notablemente con respecto a otras marcas.

Enerkem®, fue otra de las Compañías que mayores datos proporcionó y que si bien, sus 2 plantas más grandes apenas están por entrar en operación en el 2012, se pudo constatar su arduo trabajo antes y durante la construcción de las plantas piloto y comercial del EWMCE de Alberta Canadá.

Las dos plantas de Enerkem® a escala comercial se ubican una en Edmonton, Alberta (Canadá) y otra en Pontotoc, Mississippi (Estados Unidos). Ambas plantas, tienen una capacidad de 330 t/d cada una y están diseñadas para residuos mezclados con material orgánico a los que previamente se les retiran los materiales reciclables y durante el proceso se les retira materia orgánica y metales.

La similitud entre el tipo de residuos que tratan las plantas de Enerkem® en Canadá con los residuos que se tratarían del Distrito Federal ahora que ya se lleva a cabo una separación en fuente hace que se pueda tomar como base la tecnología y datos de esta Compañía para fines de este estudio. Además de que se trata de una compañía canadiense con plantas en América, lo cual nos puede ofrecer un mejor acercamiento en costos que los de las demás compañías de origen europeo con datos de plantas instaladas en Europa o Japón.

De acuerdo entonces a las capacidades máximas encontradas a nivel mundial, para plantas que sólo involucren gasificación, que traten RSU mezclados y que cuenten con datos suficientes que sirvan para su evaluación en este estudio se consideró una capacidad de 340 t/d de RSU mezclados. Las 340 t/d de RSU mezclados se enviarán a un pretratamiento de trituración y secado para su posterior gasificación. El flujo de entrada del gasificador será entonces de 328 t/d, una vez retirados los metales ferrosos y no ferrosos como parte del pretratamiento.

Los gasificadores por lo general, son operados 20 horas al día y el gasificador tendría una capacidad nominal de 16 t/h (EWMCE, 2011).

Integrando el sistema de recuperación de materiales, el pretratamiento, la gasificación, su limpieza de gases y la generación de energía eléctrica con cogeneración (opcional), el esquema de tratamiento quedaría como se muestra de la Figura 8-7.

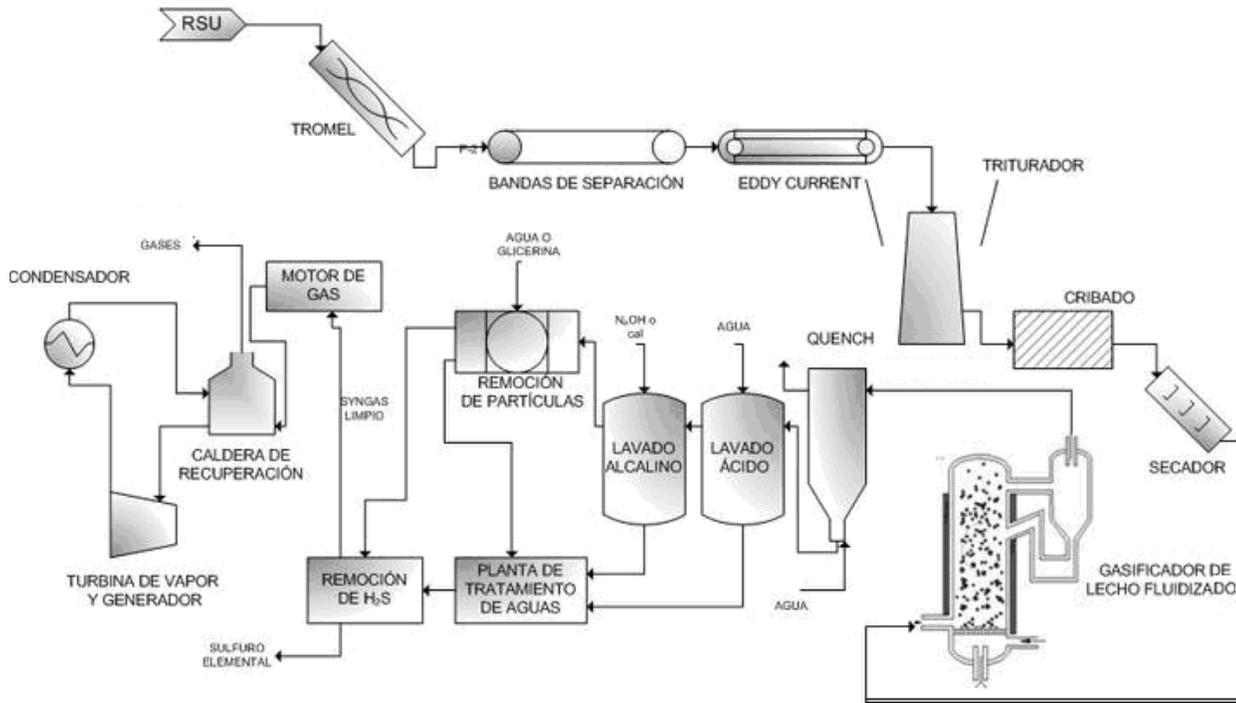


Figura 8-7 Esquema propuesto de gasificación con limpieza de gases, generación de energía eléctrica y cogeneración

8.7.5 Estimación del área requerida para el sistema de gasificación.

De acuerdo a los reportes de Enerkem® y Thermostelect® el área estimada para un tratamiento de aproximadamente 120,000 t/d oscila entre las 1.4 y 1.8 Ha (Juniper 2004; Energos, 2010) sólo para el sistema de pretratamiento y gasificación; para el sistema de limpieza de gases y generación de energía se recomienda considerar un área igual (1.8 Ha), para oficinas 0.5 Ha y para maniobra mínimo 1 Ha, por lo que en total se requieren aproximadamente 5.1 Ha.

8.7.6 Recursos Humanos requeridos para el sistema de gasificación.

De acuerdo a plantas previamente instaladas de Thermostelect®, se requieren 5 personas operativas por turno (3 turnos de 8 horas) incluyendo un operador para el sistema de generación de energía eléctrica (Hesseling, 2002). Por su parte Enerkem®, estima que para sus instalaciones con capacidad para tratar 360 t/d se requerirían 18 personas (Juniper, 2004) sólo para pretratamiento y gasificación. Para el caso de este estudio, se consideraron las recomendaciones de Enerkem®, por los motivos mencionados anteriormente y se consideraron 2 personas más por turno para el sistema de limpieza de gases y generación de energía.

Tabla 8-19 Personal operativo para la planta de digestión anaerobia

Área de proceso	Número de personal por turno	Número de personal por día	Perfil	Puesto
Pretratamiento, gasificación, limpieza de gases y generación de energía	1	3	Ingeniero	Supervisor de operación
	1	3	Ingeniero	Supervisor de Mantenimiento
	2	6	Mecánico	Técnico de Mantenimiento
	2	6	Operador	Operador de pretratamiento y gasificación
	2	6	Operador	Operador de limpieza de gases y generación de energía
Total de empleados	8	24		

Fuente: Elaboración propia a partir de Hesseling (2002), Juniper (2004) y EWMCE (2011).

8.8 Aspectos ambientales del uso de digestión anaerobia y gasificación de residuos con generación de energía.

Debido a la alta generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que conlleva la producción convencional de energía, el uso de los subproductos de los residuos sólidos urbanos, tales como el biogás de relleno sanitario, syngas de gasificación o biogás de digestión anaerobia para generar electricidad puede considerarse de entrada como una reducción significativa de emisiones de GEI por el simple hecho de evitar el consumo de combustibles fósiles.

En el caso del sistema que se evalúa en este estudio, cabe resaltar dos formas de reducción de las emisiones de GEI:

- 1) La implementación de tecnologías alternativas de aprovechamiento y disposición de residuos que disminuyen la cantidad de residuos dispuestos en relleno sanitario y que por lo tanto reducen la cantidad de gas de relleno sanitario liberado a la atmósfera.
- 2) La creación de energía “renovable” que usa combustibles derivados de los residuos sólidos y que por tanto reducen el consumo de combustibles convencionales que de otra forma se requerirían para generar la misma cantidad de energía.

En México actualmente aún existe confusión en cuanto a varios conceptos, lo cual puede frenar en determinado momento el aprovechamiento de los residuos como “energía renovable” ya que por ejemplo, la NOM-098-SEMARNAT-2002 incluye a la gasificación dentro de su concepto de incineración, argumentando que el gas combustible derivado de la gasificación (el syngas) será sometido a combustión en una atmósfera rica en oxígeno, lo que cataloga al proceso de gasificación, según esta norma, como un tipo de incineración.

Por su parte la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) excluye de las fuentes de energía renovable, a los residuos industriales o de cualquier

tipo cuando sean incinerados o reciban algún tipo de tratamiento térmico. Por lo anterior, la gasificación, que es un proceso térmico, se excluye del alcance de esta ley en su primer artículo. Sin embargo, el artículo 2, deja abierta la posibilidad de que la CRE, en determinado caso, pueda considerar a la gasificación de residuos sólidos urbanos como una fuente renovable, ya que son materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, que se regeneran naturalmente y por lo tanto se encuentran disponibles de forma continua.

En el caso de la digestión anaerobia de los residuos orgánicos, el panorama es distinto, ya que la misma LAERFTE, en su artículo 3, menciona las fuentes consideradas como renovables, entre las cuales se encuentran los bioenergéticos que determine la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB). Y a su vez, la LPDB menciona al biogás proveniente de procesos de biomasa como un bioenergético.

Es importante remarcar que la reducción de emisiones de GEI por efecto de evitar o disminuir el gas emitido en el relleno sanitario es mucho más significativa que la reducción de emisión por evitar el uso de combustibles fósiles. Esto se debe a que el Potencial de Calentamiento Global (PCG) del metano es 21 veces más que el del dióxido de carbono (IPCC, 2011).

Por otra parte, el dióxido de carbono contenido en el biogás derivado de residuos orgánicos se considera como nulo, de acuerdo a los métodos de inventario de GEI, emitidos por el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC, 2011).

8.8.1 La propuesta vista como proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

Como signatario de Protocolo de Kioto, México ha aprovechado, aunque aún de manera incipiente, el potencial para generar y someter proyectos al MDL. Al respecto, se están desarrollando actividades estratégicas para incrementar este tipo de proyectos.

El tema central de este tipo de mecanismo es la reducción de emisiones de GEI en sectores estratégicos en los que existen beneficios potenciales y muy importantes, como en el caso de la eficiencia energética y el cuidado del medio ambiente.

El MDL es un procedimiento contemplado en el Protocolo de Kioto para que países desarrollados puedan financiar proyectos de mitigación de emisiones de GEI dentro de países en desarrollo (entre los que se incluye México), y recibir a cambio Certificados de Reducción de Emisiones (CRE) aplicables a cumplir con su compromiso de reducción propio (IPCC, 2011).

El MDL es regulado y supervisado por el Consejo Ejecutivo de MDL de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Dicho Consejo Ejecutivo señala 15 categorías como las autorizadas para el desarrollo de proyectos MDL, entre las que se encuentran cuatro de nuestro particular interés:

- 1) Industrias energéticas de energías renovables o no renovables
- 2) Distribución de energía
- 3) Demanda energética y
- 4) Disposición y manejo de residuos

Un proyecto MDL debe cumplir con las condiciones de adicionalidad, de determinación de línea base y de contribución al desarrollo sostenible del país. Además, debe cumplir con el ciclo establecido por el Consejo Directivo antes de poder recibir los beneficios económicos que resultan de dicho mecanismo (INE, 2011).

El Mercado de "Bonos de Carbono" (INE, 2011):

El nombre de "bonos de carbono" se ha dado como un nombre genérico a un conjunto de instrumentos que pueden generarse por diversas actividades de reducción de emisiones. Así, se puede decir que existen "varios tipos" de bonos de carbono, dependiendo de la forma en que éstos fueron generados:

- Certificados de Reducción de Emisiones (CERs).
- Montos Asignados Anualmente (AAUs).
- Unidades de Reducción de Emisiones (ERUs).
- Unidades de Remoción de Emisiones (RMUs).

Las transacciones de bonos pueden ser desde una simple compra o venta de una cantidad específica de bonos, hasta una estructura de compra-venta con diversas opciones.

Todas las operaciones de compra-venta en el comercio de bonos de carbono están regidas por un contrato entre el comprador y el vendedor.

No hay un valor "oficial" sobre el precio de una tonelada de CO₂ reducida o no emitida. Aunque algunas agencias multilaterales han establecido ciertos precios para los proyectos de reducción de emisiones financiados por ellas mismas (por ejemplo, hasta 2005, el Banco Mundial empleó un precio de \$5 dólares por tonelada de CO₂ equivalente no emitida), el precio de la tonelada está sujeto a oferta y demanda de bonos de carbono en el mercado.

Dado que existen diferentes esquemas para el comercio de los bonos y diferentes sitios del mundo donde se pueden comprar y vender, pueden existir precios diferentes por cada tonelada de CO₂.

El Fondo Mexicano del Carbono (FOMECAR) cuenta por ejemplo con varios comercializadores institucionales de bonos de carbono como son:

- Banco Mundial
- Fondo de Carbono KfW
- CAF/Programa Latinoamericano del Carbono, Energías Limpias y Alternativas

Así mismo, existen diferentes organizaciones privadas que informan sobre el precio de los bonos de carbono en sus sitios, como ejemplo se muestran dos de las más conocidas en la Tabla 8-20.

Tabla 8-20 Costos del bono de carbono

Institución	Periodo de monitoreo de costo	Fluctuación de Costo por tonelada de CO ₂ equivalente ⁴⁴	Referencia
Chicago Climate Exchange	2003 – Septiembre 2011	US \$ 0.90 – US \$ 2.20	(CCFE, 2011)
EuropeanClimate Exchange Carbon	2005 – Septiembre 2011	€ 6.40 – € 19.70	(European Commision, 2011)

Fuente: (CCFE, 2011) y (European Commision, 2011)

8.8.2 Emisiones de GEI de la gasificación de residuos sólidos urbanos

Las emisiones del proceso de gasificación se obtuvieron de los mismos proveedores con base en toneladas liberadas de CO₂ por MWh generado (producción bruta), los datos se muestran en la Tabla 8-21.

Tabla 8-21 Dióxido de carbono liberado por KWh de electricidad producida mediante gasificación

Proveedor	CO ₂ liberado (t _{CO2} /MWh _{Electricidad producida})
Enerkem	0.32
Thermoselect	0.06

Fuente: (Juniper, 2004)

Las emisiones potenciales al aire de un proceso de gasificación, dependen de cómo sea convertido el syngas a energía. En este caso de estudio, el syngas se limpia antes de la combustión para posteriormente usarlo ya sea en motores o turbinas de gas.

8.8.3 Contaminantes típicos del syngas.

Los contaminantes típicos del syngas se enlistan y describen brevemente en la Tabla 8-22.

⁴⁴ CO₂ equivalente se refiere al equivalente en toneladas de CO₂. Los GEI contribuyen al efecto invernadero en mayor o menor grado y para tener un objetivo comparable, estas contribuciones de cada gas, se convierten a la cantidad de CO₂ necesaria para producir el mismo efecto (IUEP, 2011).

Tabla 8-22 Contaminantes típicos del syngas

Contaminante	Observaciones
Dioxinas y furanos	Las condiciones reductoras de la gasificación minimizan la formación de dioxinas. El syngas se usa directamente en motores de gas o turbinas, lo cual evita las condiciones para la formación de dioxinas a baja temperatura, lo cual sucede en una combustión normal. Por lo anterior, la formación de dioxinas no es tema de preocupación en este proceso.
Metales pesados	Los metales pesados en el syngas son el resultado de una vaporización de compuestos metálicos con un relativo bajo punto de ebullición que se hayan quedado en la corriente de alimentación del reactor. Metales como el mercurio o el cadmio son típicamente encontrados en el syngas. El arsénico, en especial el extremadamente peligroso hidruro de arsénico también se ha encontrado en syngas. Esto sucede debido a que los compuestos de arsénico presentes en los residuos sólidos reaccionan con el hidrógeno recién formado durante las condiciones de gasificación.
Gases ácidos	Los gases ácidos en el syngas parecen formarse especialmente en condiciones reductoras, tal es el caso del sulfuro de hidrógeno (H ₂ S), ácido cianhídrico (HCN), sulfuro de carbonilo (COS) y amoniaco (NH ₃). Dichas especies son diferentes a las que se forman en sistemas de combustión convencional y pueden requerir una tecnología de lavado o depuración de gases.
Partículas	Esta es una mezcla de cenizas de gasificador e hidrocarburos residuales de alto punto de ebullición (alquitranes). La presencia de alquitranes involucra retos particulares y muchos tecnólogos no consideran cuidadosamente este requerimiento.
NOx	Los NOx no parecen representar un problema en la fase de reducción, sino hasta la etapa de uso de los motores de gas. Como sea, cuando el syngas se combustiona con exceso de aire en motores de gas, los NOx pueden convertirse en un problema. Los NOx deben ser eliminados cuando se usen motores de gas, a modo de cumplir mejor con los límites de emisión.
Monóxido de carbono	Usualmente el monóxido de carbono (CO) solo es motivo de preocupación después de los motores de gas, cuando la eficiencia de conversión es baja. El CO es un componente esencial del syngas en la etapa anterior a los motores de gas.

Fuente: (Juniper, 2004)

8.8.4 La limpieza del syngas.

La limpieza del syngas no se realiza solamente para minimizar las emisiones a la atmósfera. Para poder utilizar el syngas en motores de gas *in-situ* se deben tomar otras medidas para reducir el nivel de ciertos contaminantes, especialmente los gases ácidos (los cuales pueden causar corrosión en el motor), las partículas (las cuales pueden causar erosión en ciertas partes) y metales traza (los cuales se condensan causando erosión y bloqueos). Un sistema de limpieza de syngas para uso en motores puede ser como el que se muestra en la Figura 8-8.

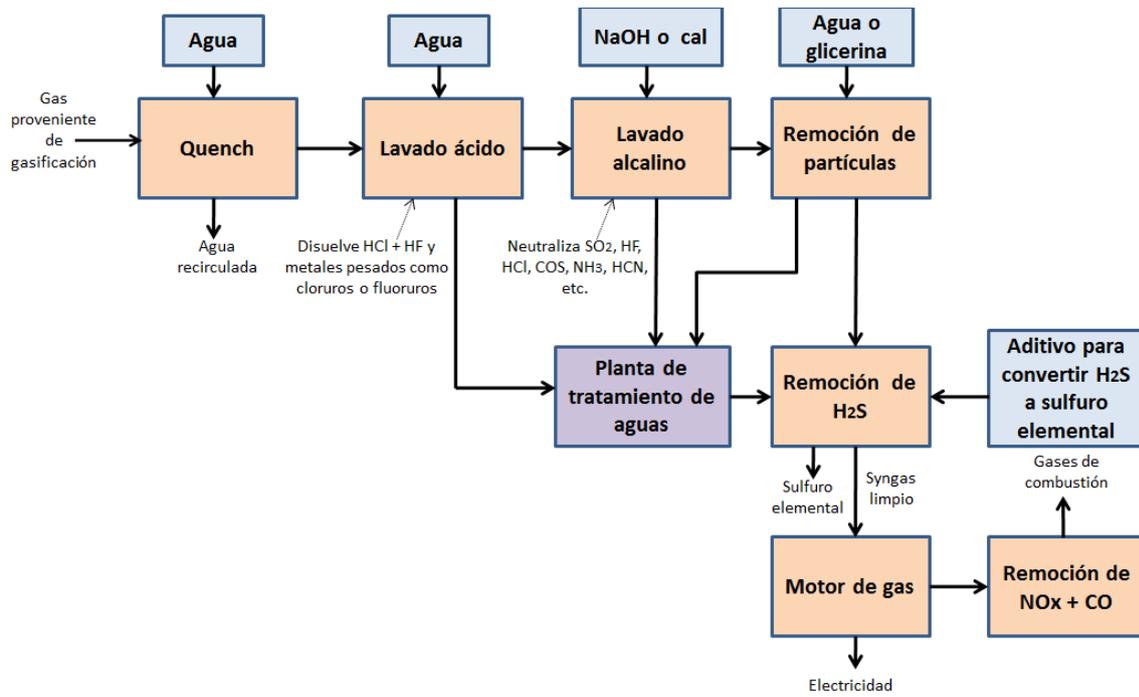


Figura 8-8 Diagrama de limpieza de syngas

Fuente: Adaptado de Juniper (2004)

8.8.5 Contaminantes típicos del biogás

En general, el biogás puede contener distintos tipos de contaminantes dependiendo de su fuente de origen. En la Tabla 8-23 se enlistan y describen brevemente los tipos de contaminantes que han encontrado en diferentes tipos de biogás:

Tabla 8-23 Contaminantes típicos del biogás.

Contaminante	Observaciones
Gases de Azufre	El biogás, especialmente el gas de relleno sanitario contiene una variedad de compuestos de azufre, como sulfuros, disulfuros y tioles. Especialmente los compuestos azufrados oxidados (como sulfatos y sulfitos) son corrosivos en presencia de agua. Esto se debe remover a fin de evitar la corrosión de los compresores, tanques de almacenamiento de gas y motores. El compuesto azufrado principal en el biogás es el sulfuro de hidrógeno. Este es reactivo con la mayoría de los metales y la reactividad se logra mediante concentración y presión, la presencia de agua y temperaturas elevadas.
Compuestos halogenados	Los compuestos halogenados (como son el tetracloruro de carbono, clorobenceno, cloroformo y trifluorometano) frecuentemente se presentan en biogás de rellenos sanitarios, pero rara vez en el biogás de digestión anaerobia de residuos orgánicos. Los halógenos se oxidan durante el proceso de combustión. Los productos de combustión son corrosivos, especialmente en la presencia de agua y pueden causar corrosión en las tuberías aguas abajo y sus aplicaciones. También pueden iniciar la formación de dioxinas y furanos si las condiciones de combustión (temperatura y tiempo) son favorables para ello. La mayoría de las especies halogenadas en biogás de relleno sanitario, son el resultado de la volatilización directa de los componentes de los residuos sólidos y su presencia depende de la presión de vapor bajo las condiciones del relleno sanitario. Los contaminantes fluorados más comunes son los clorofluorocarbonos (CFC), los cuales se usaban ampliamente como refrigerantes, propelentes y espumas aislantes hasta que se prohibió su uso en los años 80's. Los CFC's más abundantes en el gas de relleno sanitario es el CFC-12 (diclorodifluorometano) y el CFC-11 (triclorfluorometano), los cuales parecen persistir a bajas concentraciones en los rellenos sanitarios debido a su baja volatilización a partir de residuos viejos.
Siloxanos	Los siloxanos son silicones volátiles unidos por radicales orgánicos. Se encuentran en el biogás de rellenos sanitarios y de digestión anaerobia de lodos. Se originan de diferentes tipos de productos, como son champús, detergentes y cosméticos. Los siloxanos se convierten durante la combustión en depósitos inorgánicos de silicatos. La cantidad de sílice se debe reducir al mínimo, especialmente para las aplicaciones a motores. Los depósitos de silicio en válvulas y paredes de tuberías son la causa extensiva de daño por corrosión o taponamiento.
Amonio	Las altas concentraciones de amonio son un problema para los motores de gas. Normalmente los proveedores recomiendan un máximo de 100 mg/nm ³ de amonio, como aceptable. La combustión del amonio conlleva a la formación de óxidos de nitrógeno (NO _x).
Polvo y partículas	Toda planta de biogás debe estar equipada con algún tipo de filtro y/o ciclón para reducir las cantidades de partículas en el gas. Los filtros no sólo remueven partículas sino que también reducen el contenido de agua o aceite. El tamaño de malla que se considera normal para los filtros es entre 2-5 micras.

Fuente: (Persson, 2006)

Según Persson (2006), el gas de relleno sanitario contiene más de 500 diferentes contaminantes, como son, hidrocarburos halogenados y compuestos aromáticos. El biogás de relleno sanitario y el de digestión anaerobia de lodos puede contener incluso siloxanos que pueden provocar severos problemas en la instalación aguas abajo. Sin embargo, el biogás de residuos orgánicos separados en fuente, no representa mayor problema en la limpieza de gases, ya que lo único que se recomienda es quitar la humedad de dicho biogás, no hay producción de siloxanos debido a que dichos compuestos provienen de sustancias químicas fabricadas principalmente para productos cosméticos, como champús y otros.

De acuerdo a todo lo anterior, se puede afirmar que la mayoría de las veces, el biogás producido por digestión anaerobia requiere un sistema de limpieza de biogás relativamente sencillo, es decir, que cuente con filtros con tamaño de malla entre 2-5 micras, cuya principal tarea es remover el contenido de ácido sulfhídrico y la humedad del biogás que ingresará a los motores de combustión interna (MCI).

También se recomiendan quemadores de gas que se utilizan como dispositivos de emergencia para incinerar los excesos de biogás en caso de que un MCI quede fuera de servicio por algún motivo.

8.8.6 Límites máximos de emisión a la atmósfera.

Los límites máximos de emisión de contaminantes de emisión a la atmósfera para un proceso de gasificación deben ser medidos a las condiciones en que opera el proceso, es decir, a baja concentración de oxígeno y base seca si es posible. En el trabajo de Juniper (2004) dichos límites fueron medidos y/o corregidos para cumplir con tal requerimiento, considerando los límites de la Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), los de la Environmental Protection Agency de Estados Unidos (USEPA) y los de la European Union (EU).

En el caso de México no se cuenta con límites corregidos para un proceso de gasificación, por lo que sólo se pueden tomar como referencia los que marca la NOM-098-SEMARNAT-2002 Protección Ambiental – Incineración de Residuos, Especificaciones de Operación y Límites de Emisión de Contaminantes.

Como se puede observar en la Tabla 8-24, en ocasiones, los límites que marca la NOM-098-SEMARNAT-2002 parecen ser más estrictos que los demás, sin embargo, técnicamente no pueden compararse con los demás debido a las condiciones de incineración convencional para los que fueron establecidos. Por lo que en caso de instalar un sistema de gasificación en México, se deberán tomar en cuenta los límites establecidos internacionalmente para procesos con condiciones de gasificación.

Tabla 8-24 Límites máximos de emisión de contaminantes a la atmósfera

Contaminante	Límites de emisión según			
	CCME (medidos a 11% de O ₂ y 25°C)	EU (medidos a 11% de O ₂ y 25°C)	USEPA (corregidos a 11% de O ₂ , base seca y 25°C)	Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002 (medidos a 7% de oxígeno, base seca y 25°C)
Partículas	20 mg/m ³	9.2 mg/m ³	68.7 mg/m ³	50 mg/m ³
Monóxido de carbono (CO)	57 mg/m ³	45.8 mg/m ³	172.1 mg/m ³	63 mg/m ³
NOx	400 mg/m ³	183.2 mg/m ³	1050 mg/m ³	300 mg/m ³
COVs	NA	9.2 mg/m ³	NA	
Cloruro de hidrógeno (HCl)	75 mg/m ³	9.2 mg/m ³	115.5 mg/m ³	15 mg/m ³

Contaminante	Límites de emisión según			
	CCME (medidos a 11% de O ₂ y 25°C)	EU (medidos a 11% de O ₂ y 25°C)	USEPA (corregidos a 11% de O ₂ , base seca y 25°C)	Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002 (medidos a 7% de oxígeno, base seca y 25°C)
Fluoruro de hidrógeno (HF)	NA	0.9 mg/m ³	NA	NA
Dióxido de azufre	260 mg/m ³	45.8 mg/m ³	114.5 mg/m ³	80 mg/m ³
Mercurio	0.2 mg/m ³	0.046 mg/m ³	0.464 mg/m ³	0.07 mg/m ³
Cadmio	0.1 mg/m ³	0.046 mg/m ³	0.004 mg/m ³	0.07 mg/m ³
Plomo	0.05 mg/m ³	NA	0.039 mg/m ³	0.7 mg/m ³
Metales pesados	NA	0.046 mg/m ³	NA	0.7 mg/m ³
Dioxinas y furanos	0.5 ng/m ³	0.09 ng/m ³	0.4 ng/m ³	0.2 ng/m ³

Fuente: (SEMARNAT, 2004) y (Juniper, 2004)

Para verificar el cumplimiento real de lo anterior, se tendría que hacer una prueba experimental en un gasificador y debido a que aún no se cuenta con este tipo de equipo, se realizó una búsqueda exhaustiva de las emisiones reportadas por plantas de gasificación ya instaladas en otras partes del mundo, de lo cual, como se puede observar en la Figura 8-9.

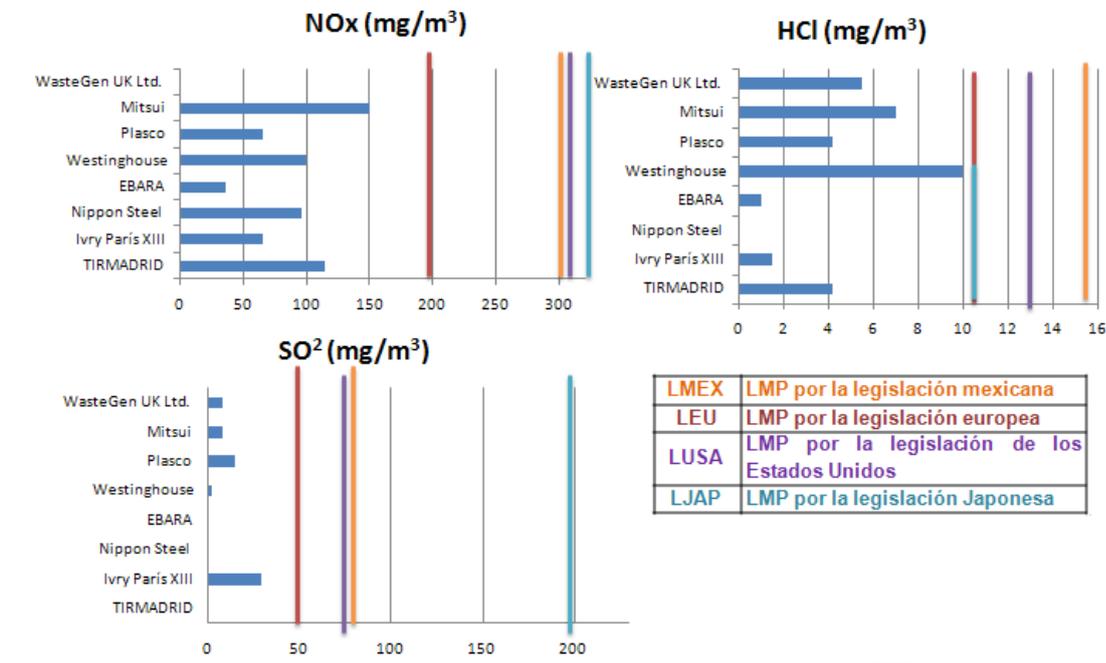


Figura 8-9 Niveles de NO_x, HCl y SO₂ reportados en plantas de gasificación internacionales

Fuente: Tomado de (Cabrera, 2010)

Para el caso de los metales pesados, se caracterizaron las muestras tomadas por nuestro grupo de trabajo, de las 13 estaciones de transferencia en el año 2009, para ver si contenían alguno de ellos, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 8-25.

Tabla 8-25 Caracterización de metales pesados en las muestras de las 13 estaciones de transferencia del D.F.

Metal	Concentración (mg/kg RSU)
Plomo	85
Zinc	245.9
Cobre	72.1
Manganeso	456.9
Mercurio	1.24
Arsénico	0.35

Debido a que no se cuenta con una prueba piloto de gasificación para poder determinar qué cantidades de estos metales pesados encontrados en las muestras de RSU de las 13 estaciones de transferencia se irían a slag y cuánto se iría a fase gaseosa, sólo se puede recomendar una limpieza de gases que garantice la eliminación de todos estos elementos encontrados, como el tren de limpieza propuesto y descrito anteriormente.

8.8.7 Residuos generados y su disposición.

En ambos procesos, gasificación y digestión anaerobia, se generan sin duda residuos que en su mayoría, deben ser dispuestos en relleno sanitario, como se puede ver en la Tabla 8-26.

Tabla 8-26 Residuos generados en gasificación y digestión anaerobia

Tratamiento	Tipo de Residuo	Fuente generadora	Disposición del Residuo
Gasificación	Carbón	Gasificador	Se recolecta en un contenedor y se envía a disposición final o estabilización
Gasificación	Ceniza	Ciclones	Se recolecta en un contenedor y se envía a disposición final o estabilización
Gasificación	Lodos prensados	Planta de tratamiento de aguas	Se recolecta en un contenedor y se envía a disposición final o estabilización
Gasificación	Carbón activado gastado	Filtros de carbón activado	Se envía a estabilización o se regresa al gasificador
Digestión anaerobia	Lodos prensados	Planta de tratamiento de aguas	Se envían a prensado y posteriormente a estabilización o compostaje.

Fuente: (Juniper, 2004)

8.8.8 Emisiones evitadas y bonos de carbono⁴⁵.

Con la implementación de ambas tecnologías se evitaría la emisión de 372,226 t/año de CO₂ equivalente por el sólo hecho de que 540 toneladas de RSU no se dispongan en un relleno sanitario sin captación de biogás (como lo era Bordo Poniente). Adicionalmente, al generar energía eléctrica sin utilizar combustibles fósiles convencionales se evitaría también la emisión de otras 68,978 t/año de CO₂ equivalente, lo que da un total de 441,205 t/año de CO₂ equivalente evitado.

⁴⁵ Para ver las consideraciones de cálculo de las emisiones evitadas y venta de bonos de carbono consulte el Anexo III.

Las emisiones evitadas además de ser un aliciente ambiental también representan un potencial ingreso económico por venta de bonos de carbono, ya que las 441,205 t/año de CO₂ equivalente evitado se pueden convertir en un ingreso de aproximadamente \$25,818,600 anuales.

8.9 Marco legal.

Para este apartado se mencionan los puntos a cumplir y trámites que marca la legislación vigente para la realización de este proyecto.

ASTM D5231-92 Cálculo del tamaño de muestra: Guía para el cálculo de tamaño de muestra.

NMX-AA-015-1985 Método de cuarteo: Método de cuarteo para el muestreo de las estaciones de transferencia

NMX-AA-022-1984 Selección y cuantificación de subproductos: Forma de seleccionar y cuantificar los subproductos de los RSU muestreados.

NMX-AA-019-1985 Peso Volumétrico in situ: Forma para calcular el peso volumétrico de los RSU en el lugar del muestreo.

NMX-AA-016-1984 Determinación de humedad: Forma de determinar la humedad de los RSU y del sitio.

NMX-AA-018-1984 Determinación de cenizas en residuos sólidos municipales: Método de determinación de cenizas.

8.9.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Establece la responsabilidad de los municipios de prestar el servicio de limpia con el concurso del Estado. Generalmente esta atribución es ratificada por la Constitución Política de los Estados y sustentada en la Ley Estatal de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Este marco sirve de referencia para establecer los lineamientos generales de los Bandos de Policía y Buen Gobierno y de forma particular los reglamentos de limpia municipal.

8.9.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y su reglamento.

Plantea que los sistemas de manejo y disposición de residuos sólidos no peligrosos quedan sujetos a autorización y legislación estatal o en su caso, municipal y la disposición final de los residuos sólidos no peligrosos, mediante rellenos sanitarios.

8.9.3 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y su reglamento.

Indica que los servicios públicos municipales que deben ser prestados por los ayuntamientos.

8.9.4 NOM-098-SEMARNAT-2002 Protección Ambiental – Incineración de Residuos, Especificaciones de Operación y Límites de Emisión de Contaminantes.

Establece que la gasificación se considera dentro del concepto de incineración marcado por esta norma, debido a que el gas combustible derivado de la gasificación (el syngas) será sometido a combustión en una atmósfera rica en oxígeno.

8.9.5 NOM-001-SEMARNAT-1996 Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Esta norma deberá cumplirse en el caso de que las descargas de aguas residuales sean destinadas a ríos, embalses naturales y artificiales y su uso en riego agrícola. La norma muestra los Límites Máximos Permisibles de contaminantes básicos, metales pesados, contenidos de patógenos y parásitos. Así mismo, se pueden encontrar los métodos de muestreo, el número de muestras y metodologías para el análisis de los contaminantes indicados.

8.9.6 NOM-002-SEMARNAT-1996 Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Esta norma deberá cumplirse en el caso de que las descargas de aguas residuales sean destinadas al alcantarillado urbano o municipal. La norma muestra los Límites Máximos Permisibles de contaminantes básicos, metales pesados, contenidos de patógenos y parásitos. Así mismo, se pueden encontrar los métodos de muestreo, el número de muestras y metodologías para el análisis de los contaminantes indicados.

8.9.7 NOM-003-SEMARNAT-1997 Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Esta norma deberá cumplirse en el caso de que las descargas de aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. La norma muestra los Límites Máximos Permisibles de contaminantes básicos, metales pesados, contenidos de patógenos y parásitos. Así mismo, se pueden encontrar los métodos de muestreo, el número de muestras y metodologías para el análisis de los contaminantes indicados.

8.9.8 NOM-004-SEMARNAT-2002 Protección ambiental – Lodos y biosólidos – Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Esta norma deberá cumplirse cuando los lodos del digestor se dispongan y/o aprovechen. La clasificación de los lodos estará en función de los Límites Máximos Permisibles de los metales pesados, cantidad de coliformes fecales, presencia de *Salmonella* y cantidad de huevos de helminto.

8.9.9 Ley Federal de Sanidad Vegetal

La aplicación de los lodos del digestor en terrenos con fines agrícolas y mejoramiento de suelos se sujetará a lo establecido en esta ley y normatividad vigente en la materia.

8.9.10 La convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

Busca promover y apoyar con su cooperación el desarrollo, la aplicación y la difusión, incluida la transferencia, de tecnologías, prácticas y procesos que controlen, reduzcan o prevengan las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal en todos los sectores pertinentes, entre ellos la energía, el transporte, la industria, la agricultura, la silvicultura y la gestión de desechos.

8.9.11 Convenio de Estocolmo.

Proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los contaminantes orgánicos persistentes (COPs). Medidas generales de prevención relativas a las mejores técnicas disponibles y a las mejores prácticas ambientales.

8.9.12 Programa Piloto de contabilidad y reporte de Gases Efecto Invernadero en México.

Programa voluntario de contabilidad y reporte de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), fundamentado en los Estándares de la "Iniciativa del Protocolo de Gases Efecto Invernadero", el Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte (Edición Revisada) y el Protocolo de GEI para Cuantificación de Proyectos.

8.9.13 Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE).

Establece los requerimientos para generadores de energía eléctrica con fines de autoabastecimiento y/o venta de energía para alumbrado público.

8.9.14 Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética.

Esta ley excluye de las fuentes de energía renovable a los residuos industriales o de cualquier tipo cuando sean incinerados o reciban algún tipo de tratamiento térmico, por lo que la gasificación, que es un proceso térmico, se excluye del alcance de esta ley, no siendo así el caso de la digestión anaerobia de los residuos orgánicos, los cuales se mencionan indirectamente en el artículo 3 de esta ley, fracción II, referente a las fuentes consideradas como renovables, las cuales define como "fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica" y entre los cuales se encuentran los bioenergéticos, que determine la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.

8.9.15 Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.

Esta ley, anteriormente referenciada por la Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética, en su artículo 2, fracción II, define a los bioenergéticos, como “Combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica de las actividades, agrícola, pecuaria, silvícola, acuacultura, algacultura, residuos de la pesca, domésticas, 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 competente en los términos de esta Ley”.

Por lo anterior, el biogás, que la misma ley define como “Gas que se produce por la conversión biológica de la biomasa como resultado de su descomposición”, se puede considerar una fuente de energía renovable de acuerdo a lo que marca la Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética.

8.9.16 Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.

Este reglamento menciona que la entrega de energía eléctrica al Sistema Eléctrico Nacional por generadores renovables se podrá llevar a cabo con los permisos correspondientes otorgados por la Comisión Reguladora de Energía, conforme a lo establecido en la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y su reglamento, en lo que resulten procedentes.

Los proyectos de generadores renovables podrán recibir una contraprestación por capacidad y energía asociada, cuando se encuentren dentro de las metas establecidas en el Programa de este reglamento, de acuerdo a las disposiciones administrativas que expida la Comisión Reguladora de Energía. Los proyectos que no se encuentren incluidos en el Programa, únicamente recibirán pago por la energía entregada al Suministrador, en los términos que emita la Comisión.

La Comisión Reguladora de Energía determinará las contraprestaciones por energía y capacidad, para los proyectos de Generación Renovable. Para tales efectos, la Comisión podrá considerar total o parcialmente los Beneficios Económicos Netos referidos en el artículo 15 de este reglamento, según el grado de cumplimiento de las metas establecidas en las fracciones I y II del artículo 19 de este ordenamiento.

8.9.17 Ley Federal de Derechos.

Regula las cuotas a cubrir por la generación, autoabastecimiento y venta de energía eléctrica de acuerdo a la cantidad de MWh generados.

8.9.18 Ley del Impuesto Sobre la Renta.

Esta ley menciona los beneficios fiscales a los que puede ser candidato un generador de energía de fuente renovable.

De acuerdo a la última reforma a la Ley del Impuesto Sobre la Renta, en su artículo 40, fracción XII, toda maquinaria y equipo destinado a la generación de energía proveniente de fuentes renovables, incluyendo los residuos, podrá gozar de un porcentaje de amortización del 100% en un solo año, siempre y cuando mantenga en operación al menos 5 años dicha maquinaria y/o equipo (DOF, 2012).

8.10 Evaluación social

Este apartado contiene un análisis de la situación social de Bordo Poniente, donde existe toda una sociedad desde hace ya muchas generaciones, que depende de la recuperación y venta de los subproductos reciclables de los RSU del D.F.

Por otra parte también es necesario tomar en cuenta el punto de vista de la sociedad ajena a Bordo Poniente, gente que vive a los alrededores, las autoridades, entre otros, para decidir si la instalación de la planta procesadora de RSU para el D.F., es factible o no socialmente hablando.

En el Relleno Sanitario de Bordo Poniente, hasta hace unos años, se acostumbraba que todos los miembros de una familia participaran en la pepena, para poder aumentar el ingreso, actualmente esa situación ha disminuido. En la planta de selección, a pesar de que aún trabajan algunas familias, esa ya no es una constante pues la mayoría de la descendencia de los pepenadores ha salido de la actividad en busca de otros oficios o con carreras técnicas.

Pese al fuerte dominio de los líderes de los gremios de pepenadores, sobre los miembros de los mismos. En fechas recientes, en la Planta de Selección de Bordo Poniente han surgido cada vez más conflictos en la interacción entre los grupos de pepenadores, pues sus ingresos se encuentran directamente relacionados con el desempeño de sus demás compañeros de grupo, creando inconformidades y fricciones entre ellos. Mientras que en el Relleno Sanitario siempre ha sido característica la convivencia, así como la solidaridad.

Los líderes, sin ningún tipo de criterio ambiental o técnico, están convencidos y defienden la idea de que la Planta de Selección de Bordo Poniente puede seguir funcionando al menos por 5 años más, pues las etapas que en la actualidad no están en uso, han bajado de nivel y tienen la posibilidad de captar más residuos. Sin embargo, los pepenadores están conscientes de que la planta de selección cerrará tarde o temprano, por lo que tienen pensado seguir trabajando ya sea en otro relleno sanitario, como pepenadores, o bien, salir de la actividad y retomar empleos informales como vendedores ambulantes en tianguis. Además, dicen tener familiares que ya se encuentran fuera de la pepena y que les pueden ofrecer otras opciones de subsistencia.

Con el cierre de la planta de selección actual de Bordo Poniente, se podría orillar a la gente dependiente de ella a buscar una nueva forma de subsistencia, como “pepenadores urbanos”, los cuales no permitirían la separación y recolección de los materiales, pues interceptarían los materiales de la fuente de generación a la nueva planta de selección, sin embargo, para los fines del GDF, cuyo principal beneficio no sería la venta de los subproductos reciclables, tal vez esta pepena urbana, representaría un beneficio y reducción de costos de recolección, transporte y tratamiento de residuos.

- Cualquier incorporación de los pepenadores al proyecto de gasificación pasa necesariamente primero por una negociación directa con los actuales líderes Pablo Téllez y su hijo Javier Téllez.

- Para que a los líderes les resulte atractivo, en la incorporación de los pepenadores al proyecto se debe garantizar que los líderes sean sus interlocutores en toda negociación.

- Los pepenadores (tanto los que laboran en la Planta de Selección como los que laboran en la zona de disposición final) aceptarían participar en el proyecto de gasificación sí sus ingresos sean equiparables a lo que perciben en su labor dentro de Bordo Poniente.

- Los pepenadores que trabajan en el relleno sanitario probablemente se encontrarían con mayor disposición a trabajar en la planta de gasificación, ya que en la actualidad ellos no son considerados dentro del gremio, no tienen un salario seguro y además no tienen el apego a la organización como el resto del grupo que trabaja en la Planta de Selección.

-Sin embargo, para este grupo de pepenadores, el horario podría ser un obstáculo para esta participación puesto que ellos no están acostumbrados a tener un horario estricto a pesar de que dentro del relleno sí cumplen con uno, no obstante, ellos escogen sus tiempo de descanso así como los lapsos para tomar alimentos.

-Una forma de lograr involucrarlos en el proyecto es dándoles la oportunidad de obtener los beneficios que no recibe de la organización de Pablo Téllez, como por ejemplo, el servicio médico, las incapacidades, la ayuda en cuanto al servicio de transporte, así como condiciones de trabajo menos adversas ocasionadas por el clima, como el sol, la lluvia o el polvo que son los principales generadores de enfermedades.

- Sin embargo, estos pepenadores son apenas 200, insuficientes frente a los 600 que requeriría el proyecto de gasificación en su primer etapa.

- En este sentido, los pepenadores agremiados a bajo el liderazgo de Pablo Téllez (600 que trabajan directamente en las bandas de la planta de selección y 900 que realizan labores alternas en la misma planta de selección), fácilmente cubren los requerimientos iniciales del proyecto de gasificación.

8.11 Evaluación económica del proyecto

La estimación de costos del proyecto se realizó a partir de los datos proporcionados por los proveedores (para el caso de gasificación) debido a que no se cuenta en México con procesos similares ni estudios preliminares especializados que permitan realizar una cotización específica y detallada para la gasificación de RSU del Distrito Federal.

Los proveedores de tecnología proporcionaron datos y costos para plantas de tratamiento de capacidad muy similar a las que se proponen en este estudio, así mismo, incluyeron en su reporte los insumos necesarios, productos generados, residuos del proceso y emisiones.

Los datos y costos proporcionados por los proveedores fueron corregidos mediante factores locales como son costos de mano de obra, costos de construcción, costo de la energía, costo de suministros y servicios de gestión de residuos en la zona. Debido a que todos los factores de corrección pertenecen al Distrito Federal, los costos y estimaciones podrían diferir en caso de aplicarse en otra región.

Los resultados obtenidos por su nivel de estudio presentan una precisión de +50% ó -30%. Los resultados finales de costos de operación se presentan en pesos por tonelada de residuos alimentados para alcanzar un punto de equilibrio, sin ganancias ni otros márgenes adicionales.

La generación de energía sólo fue evaluada y considerada *in-situ*, mediante el uso de motores de combustión interna, caldera para recuperación de energía y turbinas de vapor con generador de electricidad.

8.11.1 Costo capital

En esta sección se realizó la estimación de cada tecnología por separado y una en conjunto con base en el objetivo de este estudio. Como se puede observar en la Tabla 8-27 el costo capital de ambas tecnologías asciende a \$1,552,286,197.51, cantidad que incluye la adquisición de las 6.9 Ha de terreno requeridas para la instalación de ambos sistemas, considerando un costo al 2011 de \$804.32 por m² en el Estado de México, que es donde aún existen escasos espacios en zonas industriales (ProMéxico, 2011). Sin embargo, si el proyecto se instalara en Bordo Poniente se ahorraría ese costo de adquisición, que asciende a \$55,498,018.02.

Para los costos capitales, se consideraron las siguientes categorías:

- Presupuesto capital de equipo de proceso.
- Refacciones.
- Equipo de instalación.
- Equipos de pretratamiento.
- Manejo de ceniza (sistema de remoción, tratamiento y disposición).
- Control de emisiones al aire (filtros de syngas y biogás, lavadores de syngas).
- Monitoreo de emisiones (calidad del gas residual, monitoreo continuo de emisiones).
- Caldera y turbinas de vapor.
- Generadores y motores.
- Condensadores.
- Bombas y tubería de agua.
- Subestación e interconexión a la red del sistema eléctrico local.
- Trabajo civil/edificios.
- Sistema de protección contra fuego.
- Ingeniería, administración de proyectos, servicios de construcción.
- Costos de desarrollo (permiso, mano de obra y misceláneos).

Tabla 8-27 Estimación de costo capital

	Gasificación	Digestión Anaerobia	TOTAL
CAPITAL SUB-TOTAL ESTIMADO	1,271,689,969.07	280,596,228.44	1,552,286,197.51
Ahorro en costo de terreno si se instala en Bordo Poniente (\$)	-55,498,018.02		
COSTO TOTAL ESTIMADO	N/A	N/A	1,496,788,179.49
Costo capital (\$/kWneto instalado)	105,974.16	195,572.88	254,962.58
Costo capital (\$/t de capacidad anual instalada)	10,597.42	3,843.78	7,594.05

8.11.2 Costos de Operación.

Las categorías consideradas en los costos de operación incluyen:

- Salarios del personal.
- Rutina de mantenimiento, herramientas, vehículos, seguridad, seguro, etc.
- Consumibles/aditivos de la planta (carbón activado, estabilizadores de ceniza, adsorbentes).
- Energía comprada (energía auxiliar para el arranque de la planta y/o estabilización).
- Balance de planta e interés durante la construcción.

Tabla 8-28 Estimación de costos de operación

RUBRO	Gasificación	Digestión Anaerobia	TOTAL
Capacidad (t/año)	124,100.00	73,000.00	197,100.00
Capacidad (t/d)	340	200.00	540
Personal operativo	24.00	12.00	36
COSTO TOTAL DE OPERACIÓN (\$)	95,401,844.96	25,143,550.92	120,545,395.88
Costo de operación (\$/t)	795.02	344.43	611.60

8.11.3 Ingresos

Para el cálculo de ingresos⁴⁶ se consideraron los rubros más importantes para fines de este estudio, como son: i) venta anual de energía neta producida; ii) venta anual de compost producida y iii) venta de bonos de carbono. Cabe mencionar que no se consideró el beneficio de la Ley del Impuesto sobre la Renta que permite un 100% de depreciación en equipo o maquinaria para generar energía a partir de fuentes como los residuos. Tampoco se consideró una tarifa por disposición de residuos, que representaría un ingreso más para el gobierno o inversionista.

Tabla 8-29 Ingresos anuales estimados de Digestión Anaerobia y Gasificación

Tipo de Ingreso	TOTAL (\$)
Venta anual de energía neta producida	120,523,566.00
Venta anual de compost	161,575,280.00
Venta de bonos de carbono	165,142,912.82
GRAN TOTAL	447,241,758.82

El costo capital se amortizó a los 25 años de duración del proyecto y a una tasa de descuento del 12% (SHCP, 2009).

⁴⁶ Para ver el cálculo de ingresos, consultar el Anexo IV.

Tabla 8-30 Ingresos y egresos anuales.

RUBRO	Digestión Anaerobia y Gasificación
Costo capital amortizado a 25 años, a una tasa de descuento del 12% (\$)	190,840,447.70
Costo anual de operación (\$)	120,545,395.88
Costo total anual capital y de operación	311,385,843.58
Ingresos (\$)	447,241,758.82

8.11.4 Flujo Neto de Efectivo e Indicadores financieros: TIR, VPN y B/C.

Para el cálculo de los indicadores financieros se plantearon dos escenarios, en el primero sólo se consideraron los ingresos por venta de energía eléctrica neta generada y en el segundo se consideraron también los ingresos por venta de compost a un precio competitivo y venta de bonos de carbono. Para ver las consideraciones de cálculo ver el Anexo IV.

Una vez analizados ambos escenarios, se concluyó que la única forma de que el proyecto sea prefactible económicamente hablando es obteniendo ingresos por los venta de energía, venta de compost y venta de bonos de carbono como mínimo. También se deberá considerar el ingreso por tarifa de tratamiento o disposición de RSU que defina el inversionista o GDF.

A continuación se muestra en la Tabla 8-31 el Flujo Neto de Efectivo de la propuesta integral que incluye gasificación y digestión anaerobia con generación de energía eléctrica para su autoconsumo y venta, así como la venta de compost y bonos de carbono por emisiones evitadas de CO₂.

Tabla 8-31 Cálculo de Flujo Neto de Efectivo

Años	Inversión Inicial	2012	2013	2014	2015	2016
Inversión inicial	\$1,554,869,857.51	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Ingresos por ventas	-	\$447,241,758.82	\$447,241,758.82	\$447,241,758.82	\$447,241,758.82	\$447,241,758.82
Costos de producción						
Variables	-	\$11,283,057.21	\$11,283,057.21	\$11,283,057.21	\$11,283,057.21	\$11,283,057.21
Utilidad Bruta	-	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61
Utilidad Neta antes de impuestos	-	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61
Impuestos	-	\$196,181,416.73	\$196,181,416.73	\$196,181,416.73	\$196,181,416.73	\$196,181,416.73
Utilidad Neta	-	\$239,777,285.89	\$239,777,285.89	\$239,777,285.89	\$239,777,285.89	\$239,777,285.89
Total Flujo Neto de Efectivo	\$1,554,869,857.51	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61

Años	2017	2018	2019	2020	2021
Inversión inicial	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Ingresos por ventas	\$447,241,758.82	\$447,241,758.82	\$447,241,758.82	\$447,241,758.82	\$447,241,758.82
Costos de producción					
Variables	\$11,283,057.21	\$11,283,057.21	\$11,283,057.21	\$11,283,057.21	\$11,283,057.21
Utilidad Bruta	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61
Utilidad Neta antes de impuestos	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61
Impuestos	\$196,181,416.73	\$196,181,416.73	\$196,181,416.73	\$196,181,416.73	\$196,181,416.73
Utilidad Neta	\$239,777,285.89	\$239,777,285.89	\$239,777,285.89	\$239,777,285.89	\$239,777,285.89
Total Flujo Neto de Efectivo	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$435,958,701.61	\$438,542,362.61

Una vez calculado el Flujo Neto de Efectivo se pudieron estimar los indicadores financieros⁴⁷ que se muestran en la Tabla 8-32, donde se puede observar que el proyecto es aceptable.

⁴⁷ Para ver el cálculo de los indicadores financieros y sus consideraciones, consultar el Anexo IV.

Tabla 8-32 Indicadores financieros del proyecto

Periodo de recuperación de inversión	3.56 años
Tasa de Descuento	12%
Tasa Interna de Retorno (TIR)	25%
Valor Presente Neto (VPN)	909,225,907.1
Índice de Rentabilidad (IR)	158%
Coeficiente B/C	1.52
Dictamen	El proyecto es bueno, se acepta

9 CONCLUSIONES

Con base en los resultados de este estudio resulta prefactible instalar una planta de digestión anaerobia para tratar residuos orgánicos del Distrito Federal. Incluso, los residuos orgánicos separados de la Central de Abasto que se componen de restos de frutas, verduras y legumbres y no contienen una relación ideal de C/N pueden ser tratados mediante digestión anaerobia y generar un biogás apto para generar energía eléctrica. La energía que se generaría de tratar 200 t/d de restos de frutas, verduras y legumbres es relativamente baja, 1.4 MWh, si se compara con el consumo del digestor, que asciende a 4.49 MWh.

Con separación de residuos orgánicos e inorgánicos en fuente, es prefactible instalar una planta de gasificación para tratar residuos mezclados no recuperables del Distrito Federal y generar energía eléctrica a partir del syngas producido por el proceso. De 340 t/d que se someten al pretratamiento se pueden recuperar aproximadamente 12 t/d de metales ferrosos y/o no ferrosos y de las 328 t/d sometidas a gasificación se pueden generar hasta 12 MWh, consumiendo el sistema tan solo 1 MWh.

La energía eléctrica neta generada por el gasificador es de 11 MWh, lo cual es suficiente para cubrir las necesidades del digestor anaerobio también y generar 5.85 MWh que pueden venderse para alumbrado público y que generaría un ingreso anual de hasta \$120,523.566.

Según los resultados de esta investigación es prefactible instalar tanto la planta de digestión anaerobia como la de gasificación en el área destinada a plantas de tratamiento de RSU de Bordo Poniente. Dicha área cuenta con características técnicas adecuadas, servicios necesarios, rutas de acceso y distancia de amortiguamiento. Además, la instalación sería en un terreno destinado previamente por la CONAGUA para plantas de tratamiento de RSU, lo que representa un ahorro al no tener que pagar por el uso o compra de terreno, costo que ascendería a \$55,498,018 por las 6.9 hectáreas requeridas.

Ambientalmente, es prefactible la instalación de ambas tecnologías para tratar residuos del Distrito Federal siempre que se realice la captación y aprovechamiento de biogás, así como la limpieza de gases de la gasificación hasta cumplir con los límites de emisión establecidos. La separación de residuos en fuente y en pretratamiento es crítica para disminuir los costos de la limpieza de gases, además de que será más fácil controlar y monitorear las emisiones.

La separación de residuos también influye en la cantidad de residuos generados en la gasificación. Con separación dichos residuos ascienden a 18,981 t/d entre slag, carbón y cenizas, cuyo transporte y disposición final como residuos no peligrosos representan un costo anual de \$2,923,074.

Es de suma importancia que con la separación de los residuos se asegure la ausencia de residuos peligrosos o de manejo especial, por el contrario, la presencia de dichos residuos encarecería mucho el proceso de pretratamiento, limpieza de gases, tratamiento de aguas residuales y disposición de residuos.

Con la implementación de ambas tecnologías se evitaría la emisión de 372,226 t/año de CO₂ equivalente por el sólo hecho de que 540 toneladas de RSU no se dispongan en un relleno sanitario sin captación de biogás (como lo era Bordo Poniente). Además, por el hecho de generar energía eléctrica sin utilizar combustibles fósiles convencionales se evitaría la emisión otras 68,978 t/año de CO₂ equivalente, lo que da un total de 441,205 t/año de CO₂ equivalente evitado. Dichas emisiones evitadas también representan un potencial ingreso económico por venta de bonos de carbono, ya que se traducirían en aproximadamente \$165,142,912.82 anuales.

Socialmente, la instalación de ambas plantas en Bordo Poniente es prefactible, ya que se cuenta con la aceptación de la ciudadanía y de la gente que vivía de la recuperación de materiales en Bordo Poniente

hasta antes de su cierre el pasado 19 de Diciembre de 2011. La propuesta generaría un mínimo de 45 empleos directos permanentes contando solamente los puestos operativos de ambas plantas.

La evaluación del proyecto se realizó en un periodo de 10 años, a modo de medir tanto costos como beneficios económicos que difícilmente se notarían en los primeros años del proyecto. Utilizando una tasa de descuento del 12% por ser proyecto público para manejo de RSU, el VPN es positivo, de \$909,225,907.1, la TIR es de 25.04% y el B/C es de 1.52, por lo que económicamente la propuesta se considera factible a pesar de los costos de inversión y mantenimiento de \$1,496,788,180 y \$120,545,396 respectivamente.

La separación en fuente de los RSU juega un papel muy importante para ambas tecnologías, su complejidad técnica, cumplimiento ambiental, calidad de productos y costos.

Las capacidades que se manejan mundialmente en este tipo de tecnologías, aún es baja en comparación con la cantidad de RSU que actualmente se disponen en relleno sanitario por parte del Distrito Federal. Y aunque se pueden colocar varios módulos de ambas tecnologías para tratar las cantidades de RSU generadas por el Distrito Federal, se requerirían espacios y capital de inversión, operación y mantenimiento muy altos que no se han intentado aún en ninguna otra parte del mundo.

El tamaño de esta primera propuesta sólo trataría un 6% de los residuos que se generan diariamente en el D.F., en este estudio se pudieron determinar todas las faltantes en la gestión y manejo de los RSU que son requeridas antes de instalar este tipo de tecnologías para su tratamiento.

La mayoría de los casos de éxito a nivel internacional tanto para digestión anaerobia como para gasificación han instalado previamente plantas a nivel piloto en las que se realizan pruebas in situ de los RSU específicos a tratar, junto con las condiciones climáticas del lugar y buscando los beneficios económicos y ambientales más adecuados a la localidad, lo que eleva la rentabilidad del proyecto, ya que considera las necesidades no cubiertas del área de influencia del proyecto.

Hoy en día, los reportes de cantidades recolectadas, transferidas, tratadas y dispuestas de RSU del Distrito Federal no se encuentran actualizados oficialmente. Los inventarios y programas de RSU del D.F. datan del año 2008, por lo que fue necesario actualizar en campo los flujos mediante caracterización de RSU y entrevistas con los encargados de cada servicio.

Cabe mencionar que el año 2011 ha sido un año de grandes cambios en la gestión y manejo de RSU en la Ciudad de México, ya que por primera vez se empezó a llevar a cabo un programa de separación de residuos de forma permanente, lo cual ha provocado cambios significativos en el flujo de los residuos y la capacidad de tratamiento de residuos orgánicos se ha incrementado. Las nuevas cantidades del flujo de residuos orgánicos separados en fuente se incluyeron en este estudio.

Los residuos orgánicos separados en fuente son altamente susceptibles de ser tratados mediante digestión anaerobia, produciendo composta de alta calidad, sin embargo, la generación de energía eléctrica si depende mucho del tipo de residuo que se alimente al digestor o la combinación más adecuada de diferentes tipos. Se deben realizar pruebas de co-digestión antes de seleccionar un solo tipo de residuos para este tratamiento.

La propuesta de tratar 200 t/d sólo de residuos de la CEDA es viable, pero se genera muy poco biogás de los restos de frutas y verduras ya que contienen una relación C/N un poco más alto del 25-30 que se recomienda, son demasiado húmedos (90-95% de humedad) y contienen material celulósico, que resulta un poco más difícil de digerir. Se recomienda que primero se elabore un estudio de co-digestión con diferentes sustratos.

Los residuos orgánicos municipales, excretas de cerdo, lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos de comida de restaurantes son solo algunos de los materiales de desecho susceptibles de ser empleados como insumos para la producción de biogás con alto contenido de metano, en co-digestión con los residuos de frutas y verduras de la CEDA.

Se sugiere indagar más en el sistema seco que en el húmedo, debido a las grandes áreas que se requieren para un sistema húmedo, además de que al hacer co-digestión con otro tipo de residuos más secos, se verá favorecida la condición de un mayor porcentaje de sólidos en la mezcla (condición del sistema seco). Por otra parte, la mayoría de las plantas encontradas a nivel internacional para el tratamiento de RSU (ya sea fracción orgánica o mezcla) utilizan sistemas secos de una sola etapa.

La ubicación física del sistema debe considerar diversos factores como son: el desnivel del terreno, distancias óptimas de la unidad de generación eléctrica al digestor y/o gasificador, factores de seguridad, entre otros.

Para instalar un sistema de digestión anaerobia y/o de gasificación se deben considerar primero las condiciones climáticas locales en donde se instalará, por lo que se deben analizar las temperaturas mínimas, medias y máximas del medio ambiente, ya que ellas influirán en la selección del tiempo de retención para la eficiente degradación de la materia orgánica y/o en los parámetros de operación del gasificador.

Para que una planta de gasificación se considere comercialmente competitiva, debe generar arriba de los 75 MWe, en este caso, se generan solamente 11 MW netos. La gasificación en combinación con la digestión anaerobia en este caso resulta viable para esta cantidad tan pequeña de residuos a tratar, sin embargo, es necesario probar primero con plantas pequeñas, tal vez a nivel piloto en las que se puedan realizar pruebas y combinaciones de flujos de alimentación hasta encontrar el más adecuado.

La gasificación por el tipo de residuos mezclados que se tienen en el Distrito Federal resulta más complicada de implementar técnicamente hablando, que una incineración, la cual también podría implementarse siempre y cuando se llevara a cabo una buena limpieza de gases. La limpieza de gases sería lo más caro, pero es algo que también representa la mayor parte de la inversión en el caso de la gasificación. Otros países, debido al bajo costo de la electricidad y al no poder competir con ello, han decidido dirigir su gasificación de RSU a la obtención de otros productos, como metanol, etanol u otros productos químicos.

El hecho de que los RSU del D.F. contienen metales pesados hará muy costosa la limpieza de gases, el sistema de limpieza propuesto remueve este tipo de materiales, pero no se garantiza que se cumplan los límites máximos en emisiones al aire. Por otro lado, algunos de los metales removidos se tendrán que disponerse como residuos peligrosos. Lo ideal sería nuevamente que con la separación en fuente, este tipo de materiales (metales pesados) no llegaran hasta el sistema de tratamiento de RSU.

Los límites que marca la NOM-098-SEMARNAT-2002 para emisiones a la atmósfera, técnicamente no pueden compararse con los de la Unión Europea, CCME y USEPA para el caso de gasificación debido a que esta norma está dirigida a procesos de incineración por tanto los límites fueron establecidos bajo condiciones de incineración convencional (oxígeno, humedad y temperatura). En caso de instalar un sistema de gasificación en México, se deberán tomar en cuenta los límites establecidos internacionalmente y dirigidos a procesos con condiciones de gasificación (baja concentración de oxígeno y poca humedad principalmente).

BIBLIOGRAFÍA

Entrevistas

Estrada, R. (28 de Junio de 2011). Subdirector de Reciclaje/DTD.F./DGSU/SOS. (N. Delgadillo, Entrevistador) México, D.F.

Licea, J. (02 de Septiembre de 2010). Subdirector de Operación de Disposición Final (N. Delgadillo, Entrevistador).

López, J. (05 de Octubre de 2010). Funcionamiento actual de la Planta de Composta de Bordo Poniente y Perspectivas a Futuro. (N. Delgadillo, Entrevistador).

Sánchez, O. (05 de Octubre de 2010). Funcionamiento actual de la Estación de Transferencia Central de Abasto. (N. Delgadillo, Entrevistador)

Informes Oficiales

DGSU. (2004). *Estudio de impacto ambiental del sitio llamado Bordo Poniente*. México, D.F.: DGSU.

DGSU. (2010). *Manejo de Residuos Sólidos*. Recuperado el 20 de Junio de 2010, de http://www.obras.D.F..gob.mx/servicios_urbanos/residuos/rec_trans_sel_final.html

Gobierno del Distrito Federal, (2007). *Programa General de Desarrollo 2007 - 2012*. México, D.F.

Gobierno del Distrito Federal, (2009). *Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal 2009-2014*. México.

Gobierno del Distrito Federal, (2010). *Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Distrito Federal*. Gaceta Oficial del Distrito Federal.

Gobierno del Distrito Federal, (2011). Código Fiscal del Distrito Federal. 123. Distrito Federal: Gaceta Oficial del Distrito Federal.

Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal. (2008). *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2008*. Recuperado el 14 de Enero de 2010, de Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal: <http://www.sma.D.F..gob.mx/rsolidos/inventario-08/5-resultados.pD.F.>

SEMARNAT. (1 de Octubre de 2004). NOM-098-SEMARNAT-2002. México, D.F., México: Diario Oficial de la Federación.

SMA. (2007). *Inventario de residuos sólidos urbanos, 2007*. Recuperado el 26 de Marzo de 2009, de http://www.sma.D.F..gob.mx/rsolidos/inventario/residuos_solidos_web.html

SMA. (2008). *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2008*. México, D.F., Secretaría del Medio Ambiente, Gaceta Oficial del Distrito Federal.

SMA. (2010). *Convenio para el Cierre de Bordo Poniente*. México, D.F.

DOF. (2012). *Ley del Impuesto Sobre la Renta*. México: DOF.

SHCP. (2009). *Lineamientos para la elaboración del análisis costo y beneficio de los proyectos para prestación de servicios a cargo de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal*. México: Diario Oficial de la Federación.

Libros

Cabrera, M. d. (2009). *Evaluación de la seguridad del relleno de desechos sólidos de la Etapa IV de Bordo Poniente*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM.

Cabrera, N. (2010). *Opciones de tecnologías de conversión térmica para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal*. México, D.F.: UNAM.

Castillo, H. (1999). *Garbage, work and Society*. México: Instituto de Investigaciones Sociales UNAM.

CFE. (2009). *Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico 2009*. (29 Edición). México.

Espinoza, J. T. (2011). *Criterios para la selección de tecnologías de generación de potencia eléctrica a partir de la valorización energética de RSU*. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México.

Garcés, M. (2010). *Caracterización y muestreo de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal*. Ciudad de México, UNAM.

GTZ. (1999). *Análisis de Mercado de los Residuos Sólidos Municipales y Evaluación de su potencial de desarrollo*. Secretaría de Ecología y GTZ.

Guilford, N. (2009). *A new technology for the anaerobic digestion of organic waste*. Toronto, Universidad de Toronto.

Huízar, E. (2011). *Herramienta cuantitativa para la evaluación de tratamientos térmicos de residuos sólidos urbanos con potencial energético*. Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mora, J. A. (2004). *El problema de la basura en la Ciudad de México*. México: Fundación de estudios urbanos y metropolitanos.

Palacios, S. (2011). *Propuesta tecnológica para la valorización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal*. México, Distrito Federal, UNAM.

Pantoja, S. (03 de Marzo de 2011). *El Universal*. Recuperado el 05 de Marzo de 2011, de Sólo se recibirá basura separada: <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/105384.html>

Persson, M. (Diciembre de 2006). *Biogas Upgrading to Vehicle and Grid Injection*. Suecia.

Pichtel, J. (2005). *Waste Management Practices, Municipal, Hazardous and Industrial*. Estados Unidos: Taylor & Francis Group.

Ramos, A. (03 de Abril de 2011). *GIRESOL*. Recuperado el 08 de Abril de 2011, de México: Bajan volumen de basura: http://www.giresol.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=1887:m%C3%A9xico-bajan-volumen-de-basura&Itemid=5

SEDESOL. (1998). Manual para la operación de rellenos sanitarios. 2.7 - 2.9. México, D.F.: Secretaría de Desarrollo Social.

SOS. (1993). *Diseño de un relleno sanitario en el sitio denominado Bordo Poniente*. México, D.F.: Dirección de Transferencia y Disposición Final.

Tchobanoglous. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. McGraw Hill/Interamericana de España SA.

Tchobanoglous, G. (1993). *Integrated Solid Waste Management*. Estados Unidos de Norteamérica: McGraw-Hill.

Verma, S. (2002). *Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes*. Tesis para obtener un Master of Science Degree in Earth Resources Engineering, Columbia University, Department of Earth & Environmental Engineering.

Presentaciones

Muñoz, J. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos para autoabastecimiento eléctrico de la Ciudad de México. Distrito Federal, México.

Téllez, P. (1° de Septiembre de 2009).

Publicaciones

Balboa, B. (22 de Noviembre de 2010). *Será caro el cierre de Bordo Poniente*. Recuperado el 2010 de Noviembre de 22, de El Universal: www.eluniversalD.F..mx/home/nota15155.html

Bastide, G. (Noviembre de 2010). *IEA Bioenergy*. Recuperado el 01 de Diciembre de 2010, de French report: http://www.iea-biogas.net/download/publications/country-reports/2010/France_Country_Report_11-2010.pD.F.

Bonmatí, A., & Magrí, A. (Junio de 2007). Tecnologías aplicables en el tratamiento de las deyecciones ganaderas: un elemento clave para mejorar su gestión. 48. Girona.

Braun, R. (26 de Mayo de 2010). *IEA Bioenergy*. Recuperado el 20 de Abril de 2011, de Country Report Austria: <http://www.iea-biogas.net/download/publications/country-reports/may2010/austria.pD.F>.

California Integrated Waste Management Board. (2008). *Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste*. California: California Environmental Protection Agency.

Cambell, F. (2008). An overview of the history and capabilities of the Thermoselect technology.

Chornet, E. (2009). *Gasification of heterogeneous biomass residues and catalytic synthesis of alcohols*. Enerkem.

Columbia University. (2005). *Solid waste management alternatives for the city of New York*. Recuperado el 10 de 03 de 2011, de www.columbia.edu/cu/mpaenvironment/pages/projects/EDC%20Submission.pD.F.

Cruz, N. (28 de Octubre de 2010). *El Universal*. Recuperado el 28 de Octubre de 2010, de Plantas de reciclaje sin materia prima: <http://www.eluniversal.com.mx/nacion/181486.html>

- De la Tijera, E. (16 de Octubre de 2007). Plásticos: ¿Biodegradables o reciclables? México: Congreso Ambiental Internacional.
- DEFRA. (2007). Advanced Thermal Treatment of Municipal Solid Waste. 13-14. United Kingdom, Reino Unido: DEFRA.
- Díaz, A. (2009). Publicaciones UJAT. *Propuesta de un Sistema Digestor Anaerobio y Generación Eléctrica para abastecer el Herbario de la DACBioI*, 11-19. Tabasco, México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Entech. (s.f.). *Renewable energy technologies. How the pyrolytic gasification chamber works.*
- FEMISCA. (2009). Evaluación y selección de tecnologías para el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal. Distrito Federal.
- Govasmark, E. (Octubre de 2010). *IEA Bioenergy*. Recuperado el 18 de Noviembre de 2010, de Country Report Norway: http://www.iea-biogas.net/download/publications/country-reports/2010/Norway_Country_Report_11-2010.pD.F.
- Hardwood, O. (Noviembre de 2010). *IEA Bioenergy*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2010, de UK Country Report: http://www.iea-biogas.net/download/publications/country-reports/2010/UK_Country_Report_11-2010.pD.F.
- Heinrich, J. (3-5 de Noviembre de 2010). *IEA Bioenergy*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2010, de IEA Bioenergy Task 37: http://www.iea-biogas.net/download/publications/country-reports/2010/Germany_Country_Report_11-2010.pD.F.
- Hesseling, W. (Diciembre de 2002). Case Study Thermosteact Facility Karlsruhe. Holanda.
- IEA Bioenergy. (2010). *IEA Bioenergy*. Recuperado el 28 de Marzo de 2011, de Anaerobic Digestion Report, Turkey's Situation in Biogas: http://www.iea-biogas.net/download/publications/country-reports/2010/Turkey_Country_Report_11-2010.pD.F.
- INEGI. (2007). *Volumen de ventas de ganado porcino según función zootécnica por entidad y municipio*. México: CAGYF.
- INEGI. (2010). *Estadísticas / Residuos*. Recuperado el 21 de Abril de 2011, de Recolección de residuos sólidos urbanos y población beneficiada por entidad federativa, 2000 a 2009: <http://www.inegi.org.mx/Sistemas/temasV2/Default.aspx?s=est&c=21385>
- INEGI. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 03 de Abril de 2011, de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=09>
- Integrated Waste Management Board. (2008). *CalRecycle CA.GOV*. Recuperado el 11 de Septiembre de 2011, de <http://www.calrecycle.ca.gov/publications/Organics/2008011.pD.F>.
- JICA. (1999). Estudio sobre el manejo de residuos sólidos para la Ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos. *Informe Final, Volumen 1*, 16. Distrito Federal.
- Juniper. (2004). *Study of Gasification/Pyrolysis of MSW Residuals*. Edmonton.

López, A. (S/A). Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás. 35. Colombia: Asociación Colombiana de Porcicultores y Fondo Nacional de la Porcicultura.

Murphy, J. (3 de Noviembre de 2010). *IEA Bioenergy*. Recuperado el 29 de Marzo de 2010, de Country Report Ireland: http://www.iea-biogas.net/download/publications/country-reports/2010/Ireland_Country_Report_11-2010.pD.F.

Organic Waste Systems. (2011). *Organic Waste Systems*. Recuperado el 01 de Junio de 2011, de <http://www.ows.be/pages/index.php?menu=85>

Osada, M. (Diciembre de 2002). Direct melting system for MSW Recycling. Shaft Furnace Type Gasification and Melting System. 1-2.

Rintala, J. (Mayo de 2010). *IEA Bioenergy*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2010, de Country Report Finland: <http://www.iea-biogas.net/download/publications/country-reports/may2010/finland.pD.F>.

RIS International. (2005). *Feasibility of generating green power through anaerobic digestion of garden refuse form the Sacramento area*. Sacramento: Advanced Renewable and Distributed Generation Program.

Robles, J. (24 de Agosto de 2010). En lo oscuro, pacto en Bordo Poniente. *El Universal*.

RTI International. (2012). Environmental and Economic Analysis of Emerging Plastics Conversion Technologies. 62.

Thermoselect. (19 de Enero de 2005). Thermoselect. Plant and Process Description.

UNAM. (Noviembre, Diciembre de 2009). Muestreo de residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal. 31. México, Distrito Federal, México.

URS. (2005). *Conversion Technology evaluation Report APPENDICES*. Los Angeles: Los Angeles County.

Wellinger, A. (02 de Noviembre de 2010). *IEA Bioenergy*. Recuperado el 13 de Enero de 2011, de Swiss country update: http://www.iea-biogas.net/download/publications/country-reports/2010/Switzerland_Country_Report_11-2010.pD.F.

Werner, U. (1989). *Biogas Plants in Animal Husbandry*. Alemania: Vieweg & Sonh.

Williams, P. T. (2005). *Waste Treatment and Disposal*. Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd.

Revistas

Davis, G. (Febrero de 2009). Driving Commercial and Industrial Waste Reduction in Queensland, Australia. The potential application of a UK Waste Minimisation Club. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 35(1), 51-63.

Engineering News Record. (14 de Junio de 2004). Construction Economics. *Engineering News Record*, p25-26.

Karellas, S. (2010). Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1273-1282.

Kayhanian, M. (1995). Biodegradability of the organic fraction of municipal solid waste in a high-solids anaerobic digester. *Waste Management and Research*, 13, 123-136.

RWBeck. (2004). *Anaerobic Digestion Feasibility Study*. Iowa: Bluestem Solid Waste Agency.

SGC. (Mayo de 2010). *IEA Bioenergy*. Recuperado el 28 de Marzo de 2011, de Country Report Sweden: <http://www.iea-biogas.net/download/publications/country-reports/may2010/sweden.pD.F>.

Tramonto, D. (2007). La selezione dei rifiuti dopo la raccolta. En D. Goi, *Smaltimento dei rifiuti solidi urbani* (pág. 123). Italia: Centre for mechanical sciences monografie CISM.

Sitios Web

Axpo-Kompogas. (2011). *Axpo-Kompogas*. Recuperado el 09 de Junio de 2011, de <http://www.axpo-kompogas.ch/index.php?path=home&lang=en>

CCFE. (2011). *Chicago Climate Futures Exchange*. Recuperado el 09 de Septiembre de 2011, de <http://www.ccfе.com/ccfe.jsf>

CONAPO. (2009). *Población de México 2005 - 2050*. México: Consejo Nacional de Población.

Dove Equipment and Machinery Co. LTD. (2010). *Dove Equipment and Machinery Co. LTD*. Recuperado el 01 de Junio de 2010, de Trommels, revolving screens (wet/dry): http://www.dovemining.com/trommel_classifier.htm

EBARA. (2007). *TwinRec Reference List*. Recuperado el 23 de Febrero de 2011, de <http://www.ebara.ch/en/twinrec.php?n=1>

Energos. (2010). *ENER-G*. Recuperado el 04 de Noviembre de 2010, de www.energ.co.uk/product-information

European Commission. (2011). *European Commission Climate Action*. Recuperado el 02 de Septiembre de 2011, de http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/index_en.htm

EWMCE. (Junio de 2007). *Edmonton Waste Management Centre of Excellence*. Recuperado el 29 de Enero de 2011, de In Fact: Solid Waste Gasification - Project Overview: <http://www.ewmce.com/images/stories/PD.F.Files/05-02R.pD.F>.

Flukong Enterprise Inc. (2009). *From Solid Waste to Compost*. Recuperado el 18 de Agosto de 2009, de Flukong Enterprise Inc.: <http://www.flukong.ca/pD.F./compost.pD.F>.

INE. (2011). *Instituto Nacional de Ecología*. Recuperado el 09 de 09 de 2011, de Cambio Climático en México: http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/mercadoBonosCarbono.html

INE. (2011). *Instituto Nacional de Ecología*. Recuperado el 30 de 08 de 2011, de Cambio Climático en México: http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/desarrollodeproyectosmdl.html

International Energy Agency . (2008). *Operating Anaerobic Digestion Plants of Commercial Scale*. Recuperado el 18 de Enero de 2010, de IEA Bioenergy: http://www.iea-biogas.net/anlagelisten/Plantlist_08.pD.F.

IUEP. (2011). *International Utility Efficiency Partnership, Inc.* Recuperado el 10 de Septiembre de 2011, de www.iuep.org/RFP2006/commonconversionfactors.php

ProMéxico. (2011). *Zonas Industriales en Zona Centro*. Recuperado el 12 de Julio de 2011, de http://www.promexico.com.mx/work/sites/Promexico/resources/LocalContent/207/2/zona_centro.pdf

Renewable Energy Association. (2007). *Benefits of AD*. Recuperado el 25 de Agosto de 2009, de Renewable Energy Association: <http://www.r-e-a.net/biofuels/biogas/anaerobic-digestion/benefits-of-ad>

SIMAT. (2009). Recursos técnicos. *Bases de Datos de la Red de Depósito Atmosférico, 2009*. México, D.F., SMA / SIMAT.

SIMAT. (2010). Recursos Técnicos. *Base de Datos Meteorológicos de la Red de Monitoreo Ambiental, 2010*. México D.F., SMA / SIMAT.

SOS. (Marzo de 2011). *Secretaría de Obras y Servicios*. Recuperado el 2011 de Marzo de 07, de <http://www.obras.D.F..gob.mx/>

Valorga International. (2011). *Valorga International*. Recuperado el 03 de Junio de 2011, de <http://www.valorgainternational.fr/fr/pag8-REFERENCES.html>

Waste Separation Trommel Screens. (2010). Recuperado el 10 de Junio de 2010, de http://205.153.241.230/P2_Opportunity_Handbook/7_II_A_4.html

Software

EPA. (Marzo de 2009). *Modelo Mexicano de Biogás V.2*. México.

RETSCREEN International. (2011). *RETSCREEN*. Recuperado el 21 de Febrero de 2011, de www.retscreen.net

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AAU: Montos Asignados Anualmente

C: Carbono.

CaCO₃: Carbonato de Calcio.

CCME: Canadian Council of Ministers of the Environment.

CD: Capa dura.

CEDA: Central de Abasto.

CER: Certificado de Reducción de Emisiones.

CFC: Clorofluorocarbonos.

CFE: Comisión Federal de Electricidad.

CH₄: Metano.

CIRE: Centro Integral de Reciclado y Energía.

CNA: Comisión Nacional del Agua.

CS: Capa Superior.

CO: Monóxido de Carbono.

CO₂: Dióxido de carbono.

CO₂ equiv.: Dióxido de carbono equivalente.

COD: Chemical Oxygen Demand (Demanda química de oxígeno).

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua.

COPAR: Costos y Parámetros de Referencia.

COS: Sulfuro de Carbonilo.

COVs: Compuestos Orgánicos Volátiles.

CRE: Comisión Reguladora de Energía.

Cu: Cobre.

DDF: Departamento del Distrito Federal.

D.F.: Distrito Federal

DGSU: Dirección General de Servicios Urbanos del Distrito Federal.

DP: Depósitos Profundos.

ERU: Certificados de Reducción de Emisiones

EPA: Environmental Protection Agency.

ET: Estación de Transferencia.

EU: European Union.

EWMCE: Edmonton Waste Management Centre of Excellence.

FAI: Formación Arcillosa Inferior.

FAS: Formación Arcillosa Superior.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

H₂: Hidrógeno.

H₂S: Sulfuro de Hidrógeno.

HCl: Cloruro de Hidrógeno.

HCN: Ácido Cianhídrico.

HF: Fluoruro de Hidrógeno.

IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle (Sistema de gasificación integrado a un ciclo combinado).

K: Potasio.

GDF: Gobierno del Distrito Federal.

INE: Instituto Nacional de Ecología.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

LAERFTE: Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.

LGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

LPGIR: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

LPDB: Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.

LSPEE: Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.

MCI: Motores de Combustión Interna.

MDL: Mecanismo de Desarrollo Limpio.

N: Nitrógeno.

NaOH: Hidróxido de Sodio.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

NH₃: Amoníaco.

NOx: Óxidos de Nitrógeno.

O₂: Oxígeno.

P: Fósforo.

PEAD: Polietileno de alta densidad.

PEBD: Polietileno de baja densidad.

PET: Polietileno tereftalato

PGIRDF: Programa de Gestión Integral de Residuos para el Distrito Federal.

PICC: Panel Internacional de Cambio Climático.

PCG: Potencial de Calentamiento Global.

PP: Polipropileno.

PS: Poliestireno.

PVC: Policloruro de vinilo.

RMU: Unidades de Remoción de Emisiones.

RSU: Residuos Sólidos Urbanos.

SEDESOL: Secretaría de Desarrollo Social.

SEMARNAT: Secretaría de Marina y Recursos Naturales.

SMA: Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal.

SO₂: Dióxido de Azufre.

SOS: Secretaría de Obras y Servicios.

ST: Sólidos Totales.

SV: Sólidos Volátiles.

SVB: Sólidos Volátiles Biodegradables.

SYNGAS: Gas de síntesis.

TG: Turbinas de gas.

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.

UNEP: United Nations Environment Program.

USEPA: Environmental Protection Agency de Estados Unidos.

Zn: Zinc

\$. Peso (Moneda Nacional).

UNIDADES

UNIDAD	SÍMBOLO
Año	Año
Día	D
Gramo	G
Gigawatt hora	GWh
Grado centígrado	°C
Hectárea	Ha
Hora	H
Kilogramo	Kg
Kilómetro	Km
Megajoule	MJ
Megawatt	MW
Metro	M
Metros sobre el nivel del mar	Msnm
Micra	μ
Milibar	Mbar
Miligramo	Mg
Milímetro	Mm
Terawatt hora	TWh
Tonelada métrica	T
Watt	W

ANEXO I: GENERACIÓN DE ENERGÍA

El ingreso de mayor interés en este estudio es sin duda por el autoconsumo y venta de energía eléctrica. Tanto la digestión anaerobia como la gasificación son procesos productores de energía, sin embargo, el único que es productor neto de energía es el sistema de gasificación, el cual consume sólo 1 MWh y produce 12 MWh. Por su parte, la digestión anaerobia generaría 1.4 MWh pero consume 4.49 MWh.

Se consideró que el gasificador funciona 20 horas por día, mientras que el digestor anaerobio consume energía las 24 horas del día. Por otra parte, el sistema de generación de energía también se diseña en la mayoría de los casos para funcionar 20 horas por día, por lo que se llegó a los siguientes resultados:

Tabla I.1 Consideraciones para el cálculo de generación de energía.

Tipo de Tratamiento	Digestión anaerobia (DA)	Gasificación (G)	DA y G
Tipo de Residuo	Residuos de frutas y legumbres (CEDA)	RSU mezclados preseleccionados	
Cantidad tratada (t/d)	200.00	340.00	540.00
Sólidos Totales (%)	12.50	-	-
Sólidos Volátiles (t/d)	23.25	-	-
Sólidos Volátiles Biodegradables (t/d)	16.28	-	-
Eficiencia de conversión de SVB (%)	95.00	-	-
Producción de biogás (m ³ /tSVB)	812.50	-	-
Producción de biogás (m ³ /d)	13,223.44	-	-
Contenido energético del biogás (kWh/m ³)	6.20	-	-
Eficiencia de generación de energía eléctrica (%)	35.00	-	-
Potencia eléctrica (kW)	1,434.74	12,000.00	-
Energía eléctrica generada diaria (kWh)	28,694.86		-
Energía eléctrica generada anual (kWh)	10,473,623.67	87,600,000.00	-
Energía eléctrica generada anual (MWh)	10,473.62	87,600.00	98,073.62
Electricidad consumida (MWh)	4.49	1.00	5.49
Electricidad consumida anual (MWh)	39,347.00	7,300.00	46,647.00
Generación neta anual (MWh)	-	80,300.00	51,426.62
Potencia eléctrica total (MW)	-	-	5.86
Ingreso por venta de energía eléctrica* (\$)	-	-	121,058,272.1

* Cálculo realizado tomando como base la tarifa 5 de alumbrado en el D.F. equivalente a \$2.35/kWh (CFE, 2011).

ANEXO II: CÁLCULO DE EMISIONES EVITADAS.

En el caso del ahorro de las emisiones por los residuos no dispuestos en rellenos sanitarios, existen varios métodos para su estimación. En este trabajo se emplea el método “Rendimiento teórico de gas” de la IPCC para el cálculo de las emisiones de metano en un relleno sanitario (IPCC, 1996). Este método requiere el cálculo de la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones de metano} \left[\frac{\text{Gg}}{\text{año}} \right] = \left(\text{RSU}_T * \text{RSU}_F * \text{FCM} * \text{COD} * \text{COD}_F * F * \frac{16}{12} - R \right) * (1 - \text{OX})$$

Dónde: RSU_T – Residuos sólidos urbanos totales generados en la localidad [Gg/año].

RSU_F – Porcentaje de RSU dispuestos en rellenos sanitarios [%].

FCM – Factor de corrección de metano.

COD – Carbono orgánico degradable [%].

COD_F – Porcentaje de COD no asimilado [%].

F – Porcentaje de CH_4 en el relleno sanitario [%] (el valor por defecto es 50 %).

R – CH_4 recuperado [Gg/año].

OX – Factor de oxidación [%] (el valor por defecto es 0).

En el caso de este estudio, para el cálculo de RSU_T y RSU_F , no se utilizan datos de los RSU generados en la localidad. Para este cálculo se emplea la capacidad de tratamiento, es decir, la masa de residuos sólidos tratados de acuerdo a la capacidad de la planta. Para RSU_F se usa el porcentaje de residuos transformados junto con el porcentaje de residuos aprovechables, este valor representa la masa de residuos que no será dispuesta y no generará emisiones al ambiente, para el cálculo se utiliza la siguiente ecuación (Huizar, 2011).

$$\text{RSU}_F = \rho + \varepsilon (1 - \rho)$$

Dónde: ρ = porcentaje de residuos transformados

ε = porcentaje de residuos aprovechables

Para la determinación del FCM se considera el manejo que se le da a los residuos sólidos urbanos. El método requiere que se ingresen datos o estimados de la cantidad de RSU que son dispuestos en cada una de las categorías de sitios de disposición final. Para el caso de un sitio controlado el FCM es de 1 (Huizar, 2011).

El contenido de carbono orgánico degradable se basa en la composición de los residuos y se puede estimar por medio del promedio en peso del contenido de carbono de varios de sus componentes. De esta forma, conocida la composición de los residuos de la localidad se puede estimar este contenido.

Tabla II.2 valores comunes para los principales tipo de residuos sólidos orgánicos.

Tipo de Residuo	% COD
Residuos de papel y textiles	40
Residuos de parques y jardines y otros residuos putrescibles (excepto comida)	17
Residuos de comida	15
Residuos de Madera y paja	30

Fuente: (Huizar, 2011)

Utilizando los valores de la tabla II.1 se puede estimar el contenido de carbono orgánico de los residuos dispuestos en un relleno sanitario de acuerdo a su composición. Así, para el cálculo de este contenido se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido COD} = 0.40 (A) + 0.17 (B) + 0.15 (C) + .030 (D)$$

Dónde: A = fracción de RSU de papel y textiles.

B = fracción de RSU de residuos de parques y jardines y otros residuos putrescibles (excepto comida).

C = fracción de RSU de alimentos.

D = fracción de RSU de madera y paja.

La fracción de carbono orgánico degradable (COD_F) es la porción de COD que se convierte en gas del relleno sanitario. Ésta estima cuanto carbono no puede ser asimilado. Estas estimaciones se pueden realizar mediante un modelo teórico que depende solamente de la temperatura en la zona anaerobia del relleno sanitario:

$$0.014 T + 0.28$$

Donde T es la temperatura.

Suponiendo una temperatura constante en la zona anaerobia de 35°C, independiente de la temperatura ambiente (Bingemer, 1987), el COD_F resulta de 0.77.

El contenido de metano en el gas del relleno sanitario (F) se considera del 50%, siendo el otro 50% dióxido de carbono. Esta relación puede ser cambiada manualmente en la herramienta.

El metano recuperado (R) es la cantidad de CH_4 que se captura para su uso o su quema.

El factor de oxidación (OX) representa el CH_4 que se oxida en las capas superiores de la masa de residuos y en el material de cubierta, debido a la presencia de oxígeno. Actualmente no existe un valor aceptado internacionalmente para este factor, por lo que la recomendación es utilizar 0.

Usando como base los datos de la caracterización realizada en este estudio y recalculando los porcentajes de RSU considerando la separación en fuente de residuos domiciliarios que se lleva a cabo hoy en día los resultados son los siguientes:

Tabla II.3 Cálculo de los porcentajes de COD con base en la separación de RSU actual.

Material	Composición promedio del muestreo (%)	Residuos que por separación ya no llegan	Nueva composición de los RSU mezclados (%)	Masa supuesta (kg)	Masa después del pretratamiento	Masa antes del pretratamiento	Residuos totales	% para COD
TOTAL	-	-	-	100	328.1613588	340	540	
Cartón	2.93	-	0.062208068	2.93	21.1507431	0.034819533	21.1507431	3.916804278
Cuero	-	-	0.000424628	0.02	0.144373673	11.83864119	0.144373673	0.026735865
Hueso animal	0.04	-	0.000849257	0.04	0.288747346	-	0.288747346	0.053471731
Latas de aluminio	0.2	-	0.004246285	0.2	-	-	1.44373673	0.267358654
Cerámica	0.72	-	0.015286624	0.72	5.197452229	-	5.197452229	0.962491154
Madera	0.45	-	0.00955414	0.45	3.248407643	-	3.248407643	0.601556971
Material de construcción	1.87	1.87	-	-	-	-	-	0
Residuos electrónicos	0.06	-	0.001273885	0.06	-	-	0.433121019	0.080207596
Metales ferrosos	1.16	-	0.02462845	1.16	-	-	8.373673036	1.550680192
Metales no ferrosos	0.13	-	0.002760085	0.13	-	-	0.938428875	0.173783125
Pañales y toallas sanitarias	5.05	-	0.107218684	5.05	36.45435244	-	36.45435244	6.750806008
Papel aluminio	0.09	-	0.001910828	0.09	-	-	0.649681529	0.120311394
Papel de impresión	1.76	-	0.037367304	1.76	12.70488323	-	12.70488323	2.352756153
Papel de revista	0.79	-	0.016772824	0.79	5.702760085	-	5.702760085	1.056066682
Papel encerado	0.44	-	0.009341826	0.44	3.176220807	-	3.176220807	0.588189038
Papel sanitario	5.72	-	0.121443737	5.72	41.29087049	-	41.29087049	7.646457498
Otros papeles	1.08	-	0.022929936	1.08	7.796178344	-	7.796178344	1.44373673
Periódico	1.82	-	0.038641189	1.82	13.13800425	-	13.13800425	2.432963749
Plástico N-1 (PET)[1]	1.21	-	0.025690021	1.21	8.734607219	-	8.734607219	1.617519855
Plástico N-2 (PEAD)[2]	1.2	-	0.025477707	1.2	8.662420382	-	8.662420382	1.604151923
	Composición	Residuos	Nueva	Masa	Masa después	Masa antes del	Residuos	% para COD

Material	promedio del muestreo (%)	que por separación ya no llegan	composición de los RSU mezclados (%)	supuesta (kg)	del pretratamiento	pretratamiento	totales	
Plástico N-3 (PVC)[1]	0.17	-	0.003609342	0.17	1.227176221	-	1.227176221	0.227254856
Plástico N-4 (PEBD)[2]	0.43	-	0.009129512	0.43	3.10403397	-	3.10403397	0.574821106
Plástico N-5 (PP)[3]	0.84	-	0.017834395	0.84	6.063694268	-	6.063694268	1.122906346
Plástico N-6 (PS)[4]	0.58	-	0.012314225	0.58	4.186836518	-	4.186836518	0.775340096
Plástico N-7 (Otros plásticos) [5]	0.85	-	0.018046709	0.85	6.135881104	-	6.135881104	1.136274279
Bolsas de Plástico	6.46	-	0.137154989	6.46	46.63269639	-	46.63269639	8.635684517
Residuos finos	0.8	-	0.016985138	0.8	5.774946921	-	5.774946921	1.069434615
Residuos orgánicos (alimentos y jardín)	49.5	49.5	-	-	-	-	200	37.03703704
Tetra pack	1.1	-	0.023354565	1.1	7.940552017	-	7.940552017	1.470472596
Trapo	3.64	-	0.077282378	3.64	26.27600849	-	26.27600849	4.865927499
Unicel Poliuretano expandido	1.42	-	0.03014862	1.42	10.25053079	-	10.25053079	1.898246442
Vidrio de color	0.72	-	0.015286624	0.72	5.197452229	-	5.197452229	0.962491154
Vidrio transparente	1.93	-	0.040976645	1.93	13.93205945	-	13.93205945	2.580011009
Zapatos	0.35	-	0.007430998	0.35	2.526539278	-	2.526539278	0.467877644
Residuos de manejo especial*	1.35	1.35	-	-	-	-		0
Residuos peligrosos**	0.19	0.19	-	-	-	-		0
Otros***	2.94	-	0.062420382	2.94	21.22292994	-	21.22292994	3.93017221
Total	100.01	52.91	1	47.1	328.1613588	-	540	100

Tabla II.4 Cálculo de las variables del método IPCC

RSU (t/año)	197100
FCM	1
COD (%)	0.1549341
CODf (%)	0.77
F(%)	0.5
R	0
OX	0
Metano (t/año)	15675.9228
(A)	0.20265786
(B)	0.1066761
(C)	0.37037037
(D)	0.00601557
COD	0.1549341
GWP del Metano	21

Con el cálculo de las emisiones de metano, se pueden calcular las emisiones de CO_{2eq} considerando que el biogás contiene un 50% de metano y un 50% de CO₂ en volumen. El cálculo se muestra en la Tabla II.5.

Tabla II.5 Cálculo de emisiones evitadas al no disponer los RSU en Relleno Sanitario

	Metano	CO₂	TOTAL
Composición biogás (%)	50	50	N/A
Densidad (kg/m³)	0.714	1.96	N/A
Masa de 1m³ (kg)	0.714	1.96	N/A
Masa por año (t)	15,675.92	43,031.94	N/A
CO_{2eq} (t)	329,194.38	43,031.94	372,226.32

Además, por el simple hecho de no usar combustibles fósiles se evitan también 68,978.36 tCO_{2eq} anuales como se muestra en los cálculos de la tabla II.6.

Tabla II.6 Cálculo de emisiones evitadas por no usar combustibles fósiles para generar energía.

	Gasificación	Digestión Anaerobia	TOTAL
CO₂ (tCO₂generado/MWh)	0.32	N/A	N/A
CO₂ (kg CO₂/t)	N/A	28	N/A
Ahorro de CO₂ emitido (kgCO_{2eq}/kWhgenerado)	1.01	1.01	N/A
TOTAL CO₂ anual generado (tCO₂)	60,444.00	8,534.36	68,978.36

En total se evitan 441,205 tCO_{2eq} anualmente.

ANEXO III. CÁLCULO DE BONOS DE CARBONO.

La gasificación y la digestión anaerobia generan CO₂eq, sin embargo, al generar con sus productos (biogás y syngas) energía eléctrica, son más las toneladas evitadas que las emitidas, en comparación con las toneladas que se hubieran emitido al producir la misma electricidad por vía combustibles fósiles.

Por otra parte, si los residuos que se propone tratar mediante gasificación y digestión anaerobia, se hubieran enviado a relleno sanitario convencional, es decir, sin captación de biogás para generación de energía, también se puede considerar un ahorro de emisiones de CO₂eq.

Tabla III.1 Cálculo de ingresos por venta de bonos de carbono

Concepto	CO₂ no emitido (tCO₂eq/año)	Precio del bono de carbono (€/tCO₂eq no emitida)	Precio del bono de carbono (\$/tCO₂eq no emitida)	Ingreso anual por bonos de carbono (\$)
Generación de energía sin uso de combustibles fósiles	68,978.36	19.70	374.30	25,818,600.11
RSU que no llegaron a relleno sanitario	372,226.32	19.70	374.30	139,324,312.71
Total	441,204.68	19.70	374.30	165,142,912.82

ANEXO IV. CONSIDERACIONES PARA CÁLCULO DE FNE, VPN, TIR Y B/C.

En este anexo se muestran resumidas las consideraciones que se describieron en la sección de Evaluación Económica del Proyecto y que fueron utilizadas para el cálculo de los indicadores financieros.

Tabla IV.1 Consideraciones de cálculo

DESCRIPCIÓN	PROPUESTA FINAL					
	Periodo de evaluación del proyecto	10 años				
Inversión Inicial "terreno" si es en Bordo Poniente	\$0					
Inversión Inicial "equipo"	\$1,552,286,198					
Costo anual de operación	\$120,545,396					
Tiempo de vida útil	25 años					
Tasa de descuento	12%					
Valor de rescate "equipo"	\$0					
	Generación de Energía Eléctrica		Producción de Compost		Bonos de Carbono	
	Cantidad	Unidades	Cantidad	Unidades	Cantidad	Unidades
Inversión en capital de trabajo (4 meses)	2,583,660.00	\$	1,215,840.00	\$	-	-
Capacidad neta de planta	51,426,620.00	kWh	20,196,910.00	kg	-	-
Ventas en unidades	51,426,620.00	kWh	20,196,910.00	kg	441,204.68	tCO ₂ equiv evitadas
Precio de venta por unidad	2.35	\$/kWh de energía neta generada	8	\$/kg de compost	374.3	\$/tCO ₂ equiv
Costo unitario de mano de obra	0.15	\$/kWh de energía generada	0.06	\$/kg de compost producido	-	-
Costo unitario de materia prima	0.07	\$/kWh de energía generada	0.18	\$/kg de compost producido	-	-
Costo de materiales	0.003	\$	0.003	\$/kg de compost producido	-	-
Tasa de incremento de gastos	0.05	%	0.05	%	-	-