



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

OPCIONES DE TECNOLOGÍAS DE CONVERSIÓN TÉRMICA
PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS EN EL
DISTRITO FEDERAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

NAYELI CABRERA DELGADO



México D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor:** Humberto Rangel Dávalos

VOCAL: **Profesor:** Juan José Ruiz López

SECRETARIO: **Profesor:** Alfonso Durán Moreno

1er. SUPLENTE: **Profesor:** Manuel Miguel López Ramos

2° SUPLENTE: **Profesor:** José Agustín García Reynoso

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: TORRE DE INGENIERÍA, CUARTO PISO ALA SUR. CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

SUPERVISOR TÉCNICO:

DR. ALFONSO DURÁN MORENO

MI. ABRIL MORENO GUTIÉRREZ

SUSTENTATE:

NAYELI CABRERA DELGADO

AGRADECIMIENTOS

Muy en especial a la MI. Abril Moreno Gutiérrez por compartir sus conocimientos conmigo, por los consejos, por las aportaciones a este trabajo y por ser ejemplo y guía en esta etapa de mi vida.

Al Dr. Alfonso Durán Moreno por brindarme con su ejemplo las mayores enseñanzas, tiene usted mi total admiración. Gracias por todo.

A la UNAM por todas las oportunidades que me ha brindado pertenecer a esta máxima casa de estudios.

A mi querida Facultad de Química y todos los académicos que participaron en mi formación académica.

DEDICATORIAS

A mi madre, por brindarme la oportunidad de seguir mis sueños y ayudarme a alcanzarlos. Por el amor tan grande que tiene hacia mi hermano y hacia mí, demostrándolo con cada acción de su vida. Porque sé que sin ella nada de esto hubiera sido posible.

A mi padre, por todo su amor, por el tiempo que pasamos juntos. Por enseñarme que la vida dura un instante y que hay que vivirla intensamente.

A mi hermano, por ser mi mayor motivo de superación.

A Papi Nico, tía Gloria y primitas Isa y Ale. Por ser un apoyo incondicional y por su cariño.

A Odín y familia, por las enseñanzas de vida, el amor, el tiempo y sobre todo por el apoyo durante todos estos años.

A la señora Tere y toda su familia por darme un lugar en su corazón. Yo los llevaré en el mío para siempre.

A todos los amigos de la Facultad de Química, por haber compartido conmigo este camino, en especial a: Ulises R. eres mi mejor amigo y compañero Ingeniero, Chio V. por ser parte de esta etapa de principio a fin, Chio *Puma* por las alegrías y los momentos divertidos y Tere por ser mi confidente.

A todos los ingenieros y amigos de la Torre de Ingeniería por haber compartido este tiempo conmigo, en especial al Ing. Francisco A.

A todos los *basurólogos* en especial a Chucho por soportarme todos los días y ser un gran amigo.

*Sólo aquellos que se arriesgan
a ir demasiado lejos pueden
descubrir qué tan lejos se
puede llegar.*

T. S. Eliot



Índice de Contenido

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS	4
1. Situación actual del manejo y generación de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal	5
1.1 Área de estudio	5
1.1.1 Distribución de la población en el D.F.	6
1.2 Manejo de los RSU en el D.F.	8
1.2.1 Balance de materia	8
1.2.2 Generación	10
1.2.3 Recolección	13
1.2.4 Transferencia.....	16
1.2.5 Recuperación y tratamiento	21
1.2.6 Tratamiento de residuos	28
1.2.7 Disposición final.....	30
1.3 Conclusiones del capítulo	38
2. Los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal como combustibles	40
2.1 Composición de los residuos sólidos urbanos	42
2.2 Contenido energético de los RSU	43
2.3 Conclusiones del capítulo	50
3. Fundamentos de las tecnologías de tratamiento térmico	52
3.1 Combustión con exceso de aire (Incineración)	54
3.1.1 Tipos de hornos.....	57
3.1.2 Residuos del proceso.....	63
3.1.3 Costos.....	67
3.2 Gasificación convencional	68
3.2.1 Tipos de gasificadores	71
3.2.2 Productos obtenidos y recuperación de energía.....	74
3.2.3 Residuos del proceso.....	75
3.2.4 Costos.....	75
3.3 Gasificación por arco de plasma	77
3.3.1 Tipos de antorchas para generación de plasma.....	82
3.3.2 Productos obtenidos y recuperación de energía.....	83
3.3.3 Residuos del proceso.....	84
3.3.4 Costos.....	85
3.4 Pirólisis	86
3.4.1 Tipos de reactores de pirólisis	91
3.4.2 Productos obtenidos y recuperación de energía.....	92
3.4.3 Residuos del proceso.....	93
3.4.4 Costos.....	94
3.5 Conclusiones del capítulo	95
4. Descripción de trenes de procesos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos	96
4.1 Incineración	96
4.1.1 TIR MADRID. España	96
4.1.2 SYTCOM. Francia	100



4.2 Gasificación	103
4.2.1 NIPPON STEEL. Japón	103
4.2.2 EBARA. Japón.....	107
4.3 Gasificación por arco de plasma	111
4.3.1 Westinghouse. Japón.....	111
4.3.2 Plasco Energy Group. Ottawa	114
4.4 Pirólisis	117
4.4.1 Mitsui Babcock Energy Ltd, Japón.	117
4.4.2 WasteGen UK /TechTrade , Alemania.	121
4.5 Conclusiones del capítulo	131
5. Evaluación de tecnologías de conversión térmica	133
5.1 Definición de los criterios de decisión.	136
5.2 Definición de la escala de evaluación.....	137
5.3 Asignación de pesos para cada criterio	139
5.4 Evaluación.....	139
5.5 Resultados de la evaluación.....	141
5.6 Conclusiones del capítulo	142
6. Experiencias en la aplicación de la mejor alternativa de tratamiento térmico y generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos.	143
6.1 Interstate Waste Technologies (IWT), tecnología Thermoselect.....	144
6.1.1 Chiba, Japón.....	147
6.2 EBARA.....	150
6.2.1 Chiba (planta piloto)	150
6.3 <i>Schwarze Pumpe SVZ, Alemania</i>	153
6.3.1 Schwarze Pumpe SVZ.....	153
6.4 SUMITOMO.....	158
6.4.1 Niihama (planta piloto)	158
6.5 Conclusiones del capítulo	161
7. Conclusiones	162
8. Referencias	164



Índice de Figuras

Figura 1.	Imagen satelital del Distrito Federal.....	6
Figura 2.	Distribución de la población en las delegaciones del Distrito Federal en el año 2009.....	7
Figura 3.	Flujo de los RSU en el D.F. en el año 2008.....	9
Figura 4.	Proceso de transferencia de residuos.....	17
Figura 5.	Ubicación de las estaciones de transferencia del D.F.	18
Figura 6.	Ubicación de las plantas de selección del Distrito Federal.....	22
Figura 7.	Ubicación del relleno sanitario Bordo Poniente y etapas que lo conforman.	30
Figura 8.	Porcentaje propuesto de la composición de RSU.....	48
Figura 9.	Clasificación de los tratamientos térmicos de acuerdo con sus requerimientos de oxígeno.....	52
Figura 10.	Diagrama de flujo del proceso de incineración.....	56
Figura 11.	Estructura básica de las dibenzoparadióxinas (PCDD) y los dibenzofuranos (PCDF)	64
Figura 12.	Diagrama de flujo del proceso de gasificación	70
Figura 13.	Regiones de aplicación del plasma térmico como función del tipo de residuos sólidos.....	80
Figura 14.	Diagrama de flujo del proceso de gasificación por arco de plasma.....	81
Figura 15.	Rendimiento típico de producción de fracción líquida, sólida y gaseosa de la pirólisis de la madera. (% en peso de alimentación en base seca).....	87
Figura 16.	Mecanismo de pirólisis de la celulosa propuesto por Banyasz, 2008 (las energías de activación están expresadas en cal/mol).....	90
Figura 17.	Diagrama de flujo del proceso de pirólisis	91
Figura 18.	Proceso de incineración de RSU en la planta de TIRMADRID.....	99
Figura 19.	Proceso de incineración de RSU en la planta de Ivry Paris XIII.....	102
Figura 20.	Esquema del proceso de gasificación de Nippon Steel.....	106
Figura 21.	Esquema del proceso de gasificación TwinRec de EBARA.....	110
Figura 22.	Esquema del proceso de gasificación con arco de plasma de Westinghouse	113
Figura 23.	Esquema del proceso de Gasificación por arco de Plasma de Plasco Energy Group.....	116
Figura 24.	Esquema del proceso de la tecnología Mitsui Recycling 21 (Licencia de Siemens)	120
Figura 25.	Esquema del proceso de pirólisis de la planta Müllpyrolyseanlage	124
Figura 26.	Metodología propuesta para la evaluación de las tecnologías	134
Figura 27.	Orden preferencial parcial	141
Figura 28.	Orden preferencial total.....	142
Figura 29.	Esquema del proceso de gasificación de gasificación Thermoselect®	146
Figura 30.	Esquema del proceso de gasificación de gasificación TwinRec de EBARA	151
Figura 31.	Esquema del proceso de gasificación de Schwarze Pumpe.....	155
Figura 32.	Esquema del proceso de gasificación utilizado por Sumitomo	159



Índice de Gráficos

Gráfico 1.	Generación de RSU por entidad en el año 2008.....	11
Gráfico 2.	Generación de RSU por delegación en el D.F. en el año 2008.....	12
Gráfico 3.	Composición porcentual de generadores de RSU en el Distrito Federal	13
Gráfico 4.	Vehículos recolectores de residuos sólidos urbanos del Distrito Federal por Delegación en el año 2007.....	15
Gráfico 5.	Vehículos recolectores de residuos sólidos urbanos del Distrito Federal por Delegación en el año 2008.....	15
Gráfico 6.	Residuos sólidos ingresados a las estaciones de transferencia años 2007 a 2009	20
Gráfico 7.	Comportamiento global de los RS ingresados mensualmente a las Estaciones de Transferencia	21
Gráfico 8.	Promedio diario (en toneladas) de los residuos que ingresaron, recuperaron y egresaron en plantas de selección Bordo Poniente en el periodo 2006-2008.....	25
Gráfico 9.	Promedio diario (en toneladas) de los residuos que ingresaron, recuperaron y egresaron en plantas de selección San Juan de Aragón en el periodo 2006-2008.....	25
Gráfico 10.	Promedio diario (en toneladas) de los residuos que ingresaron, recuperaron y egresaron en plantas de selección Santa Catarina en el periodo 2006-2008	26
Gráfico 11.	Estimación de la recepción total promedio de residuos en las plantas de selección	27
Gráfico 12.	Efecto de la humedad sobre el poder calorífico	41
Gráfico 13.	PCI (base seca) de diferentes residuos generados en el D.F.....	45
Gráfico 14.	Costos de inversión para plantas de incineración de RSU en el Reino Unido.....	67
Gráfico 15.	Costos de inversión para plantas de gasificación.....	76
Gráfico 16.	Comparación de emisiones de NOx de las diferentes tecnologías	129
Gráfico 17.	Comparación de emisiones de SO ₂ de las diferentes tecnologías	129
Gráfico 18.	Comparación de emisiones de Dioxinas y furanos de las diferentes tecnologías	130
Gráfico 19.	Comparación de emisiones de HCl de las diferentes tecnologías.....	130



INTRODUCCIÓN

Los actuales hábitos de consumo, el aumento de la población y la urbanización son los principales factores que propician el incremento en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) y con ello, problemas medioambientales, económicos y sociales. Ejemplo claro es el Distrito Federal, el mayor generador de RSU en todo el país después del Estado de México, con aproximadamente 12,500 toneladas al día, problema agravado por la carencia de estrategias para un control adecuado y la falta de sitios para la disposición final, en particular por el inaplazable cierre del único relleno sanitario que da servicio al Distrito Federal, conocido como Bordo Poniente.

Por otro lado, un problema más al que se enfrenta la sociedad mexicana es la inminente crisis energética que, de acuerdo con estudios sobre el escenario de la diversificación de la energía, la que se deriva de los combustibles fósiles tradicionales (gas natural, petróleo y carbón) sufrirá una inflexión a partir del año 2020 por haber llegado al límite de sus reservas y por motivos de índole ambiental; razón por la cual se incrementará el consumo proveniente de las energías renovables (solar, eólica, geotérmica, etc.) de entre las que destacan las llamadas “nuevos tipos de biomasa” que incluye el aprovechamiento energético de los RSU. En este contexto, para el año 2050 las energías renovables deberán aportar el 33 % de la demanda energética del planeta.

Bajo este escenario, es urgente la necesidad de aplicar nuevas estrategias de manejo de los residuos sólidos encaminadas a la sustentabilidad, con las cuales se favorezca el principio de las 3 R (Reducir, Reciclar, Reutilizar) y se logre un aprovechamiento energético de los RSU.

De entre las alternativas que existen para el aprovechamiento energético de los RSU se encuentran las tecnologías de conversión térmica, que permiten una



reducción de volumen de aproximadamente el 90 % y la posibilidad de generación de energía eléctrica, éstas alternativas corresponden a tecnologías tradicionales de incineración o nuevas como son la gasificación y la pirólisis.

La incineración se lleva a cabo con cantidades de oxígeno superiores a las estequiométricamente necesarias, la gasificación a concentraciones de oxígeno subestequiométricas y la pirólisis en ausencia total de oxígeno. De estas tecnologías se pueden aprovechar las corrientes de salida para la generación de energía eléctrica, así como los gases de combustión en el caso de la incineración, o el gas de síntesis producido en la gasificación y en la pirólisis.



JUSTIFICACIÓN

Este trabajo se realizó con la finalidad de presentar un panorama global de las diversas tecnologías para tratamiento térmico de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), debido a que es necesario mostrar alternativas de solución a la problemática que se vive en el Distrito Federal en materia de disposición final de RSU, que puedan implementarse bajo el principio de sustentabilidad, minimizando la aplicación del proceso típico de confinamiento final de los mismos, que corresponde a los rellenos sanitarios, los cuales además de generar un pasivo ambiental, necesitan para su operación amplias extensiones de suelo, que son inexistentes en las grandes ciudades como el Distrito Federal.



OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar los aspectos técnicos de alternativas tecnológicas de tratamiento térmico para la valorización energética de los residuos sólidos urbanos generados (RSU) en el Distrito Federal.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión de la situación actual de la disposición final de los RSU en el Distrito Federal.
- Analizar la cantidad y composición de los residuos generados en el Distrito Federal.
- Presentar los fundamentos teóricos de los tratamientos de conversión térmica de los RSU.
- Describir los principales trenes de los sistemas de conversión térmica de residuos sólidos urbanos.
- Determinar la posible mejor opción de tratamiento térmico para los RSU del Distrito Federal.
- Mostrar datos generales de casos de aplicación a nivel mundial de la mejor alternativa de tratamiento térmico para los residuos sólidos urbanos.



1. Situación actual del manejo y generación de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal

A continuación se presentan el resultado de un análisis de la situación actual del manejo de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal en donde se consultaron tres fuentes principales: a) Estudios sobre residuos sólidos realizados por diversas instituciones del gobierno federal como SEDESOL y SEMARNAT; b) Estudios realizados por la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA-DF), específicamente los inventarios sobre residuos sólidos urbanos de los años 2006 a 2008 y c) Datos estadísticos en materia de residuos sólidos generados por el INEGI

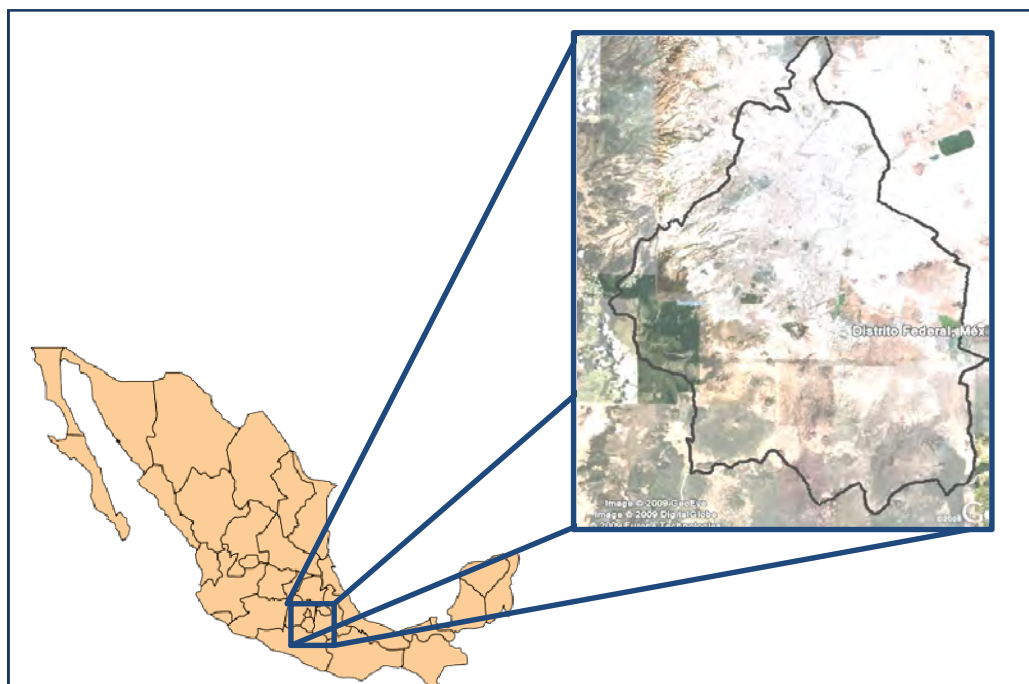
1.1 Área de estudio

El Distrito Federal se encuentra ubicado en la región centro de la República Mexicana en las coordenadas 19°29'52" N y 99°7'37" O, ocupando una extensión territorial de aproximadamente 1,500 km², que representa menos del 0.1 % del territorio nacional (1). Está dividido en 16 delegaciones políticas y tiene una temperatura anual promedio que varía entre 12 y 16°C, dependiendo de la altitud de la delegación. La Figura 1 indica la ubicación del Distrito Federal dentro del territorio nacional.

El territorio capitalino es el centro político y económico del país, con una aportación al Producto Interno Bruto (PIB) nacional del 21.8% y es, a su vez, la segunda metrópoli más poblada de América Latina, sólo después de Sao Paulo, Brasil.



Figura 1. Imagen satelital del Distrito Federal



Fuente: Elaboración propia

1.1.1 Distribución de la población en el D.F.

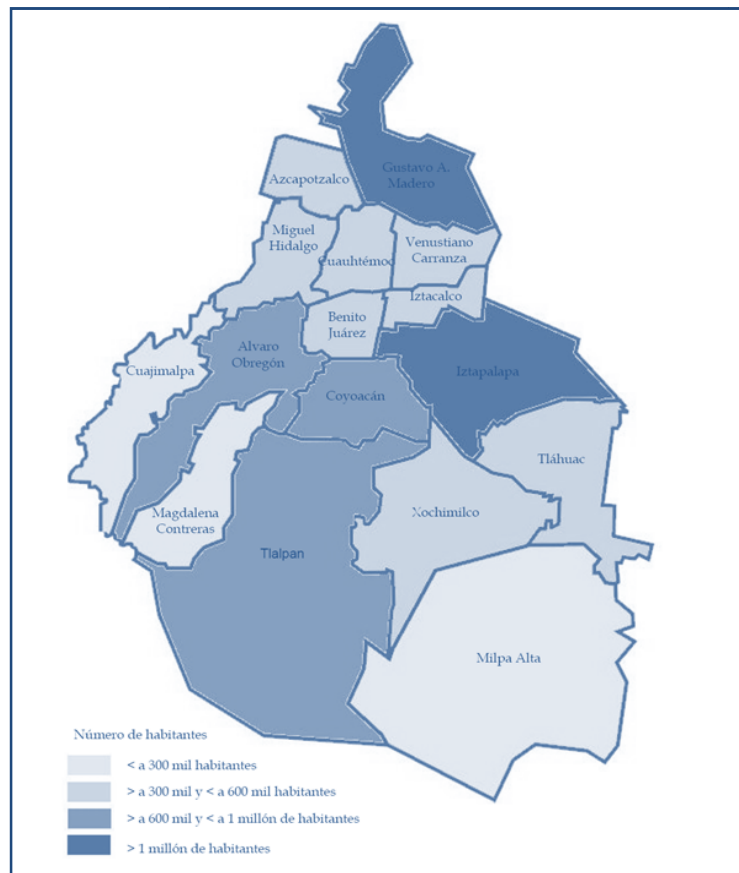
El Distrito Federal es la ciudad más rica y poblada de México, con una población proyectada para el 2009 de 8,841,916 habitantes (distribuidos como se muestra en la Figura 2). Debido principalmente al tipo de actividades económicas que se realizan y la dinámica de la población en el Distrito Federal se presenta una alta generación de Residuos Sólidos Urbanos¹ (RSU), ubicándolo en el primer lugar a nivel nacional de generación per cápita y en el segundo lugar de generación sólo precedido por el estado de México. Esta gran cantidad de residuos

¹ De acuerdo con la **Ley de residuos sólidos del Distrito** (Publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 22 de abril de 2003), los Residuos sólidos urbanos (RSU) son los generados en casas habitación, unidades habitacionales o similares que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques, los provenientes de cualquier otra actividad que genere residuos sólidos con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza de las vías públicas y áreas comunes, siempre que no estén considerados por esta Ley como residuos de manejo especial.



generados exige implementar acciones que permitan a los habitantes del Distrito Federal seguir contando con un adecuado nivel de vida, por lo que es necesario conocer la situación actual del manejo de los RSU.

Figura 2. Distribución de la población en las delegaciones del Distrito Federal en el año 2009



Fuente: Elaboración propia a partir de información de (2)



1.2 Manejo de los RSU en el D.F.

Actualmente el manejo de los RSU del Distrito Federal inicia con la recolección pública y privada de los residuos generados en las delegaciones, posteriormente, son enviados a alguna de las 13 estaciones de transferencia (Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Central de Abasto, Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Milpa Alta, Miguel Hidalgo, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco) ubicadas en 12 de las 16 delegaciones políticas, para su traslado tanto a la plantas de selección de materiales reciclables, plantas de composta o al relleno sanitario Bordo Poniente (único sitio de disposición final del Distrito Federal).

Para el gobierno capitalino, los costos del manejo de los residuos sólidos urbanos son como sigue:

El costo por tonelada recolectada es aproximadamente de \$300.00 pesos(3), el costo por tonelada transferida es de \$64.33 pesos, y por el transporte a disposición final es de \$35.18 pesos por tonelada(4), resultando en un costo total de \$399.51 pesos, únicamente por concepto de recolección, transferencia y transporte de los residuos desde su sitio de generación hasta el de disposición final, en donde el costo por cada tonelada dispuesta es de aproximadamente \$58 pesos; sumando un total de \$457.51 pesos por tonelada de RSU.

1.2.1 Balance de materia

De acuerdo al *Inventario de Residuos Sólidos Urbanos del D.F.2008* (que contiene la información más reciente publicada sobre la situación de los residuos en el D.F.), en el 2008 fueron recolectadas 10,879 toneladas de residuos al día de las cuales se enviaron a estaciones de transferencia un promedio de 10,853 ton/día y a plantas de composta delegacionales 26 ton/día. De las estaciones de transferencia se trasladaron, alrededor de 1,780 ton/día, a las

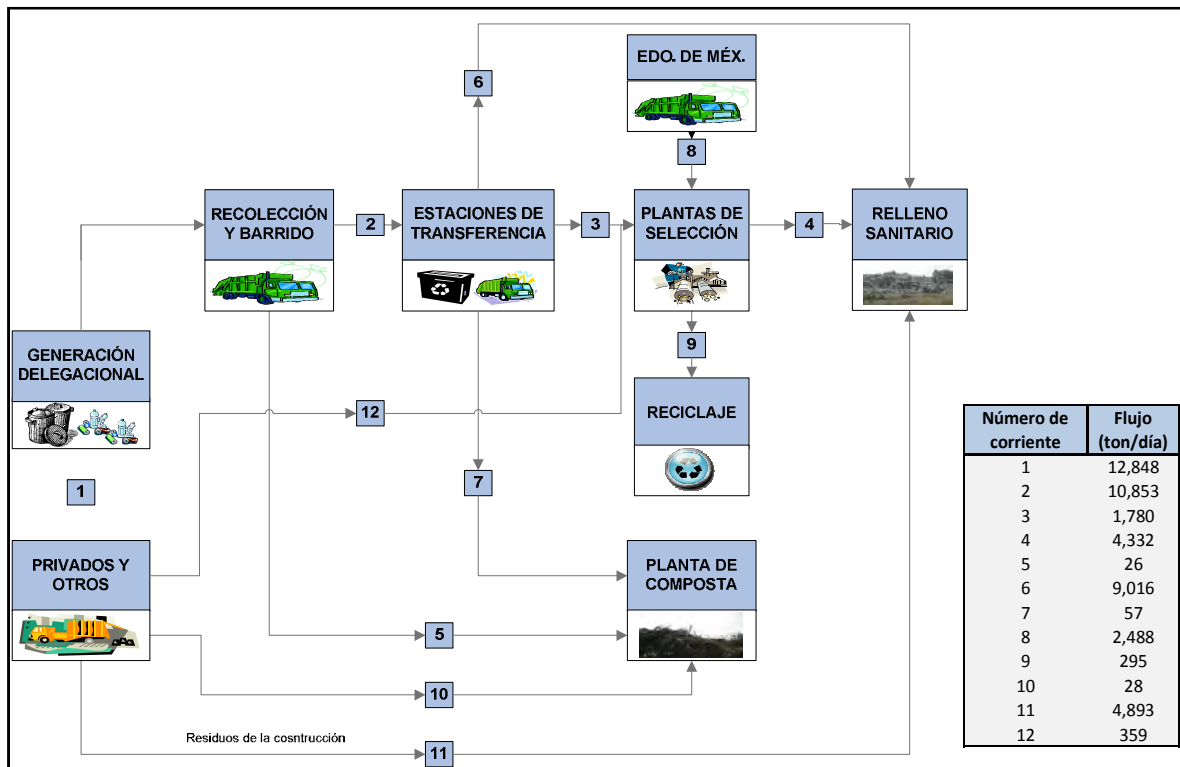


Situación actual del manejo y generación de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal

plantas de selección y 57 toneladas de residuos orgánicos a las plantas de composta (ver Figura 3)

En 2008, se recibieron 13,348 toneladas de residuos sólidos urbanos y 4,993 toneladas de residuos de la construcción en el relleno sanitario Bordo Poniente provenientes tanto del Distrito Federal como del estado de México, contabilizándose un total de residuos ingresados al relleno de 18,241 ton/día.

Figura 3. Flujo de los RSU en el D.F. en el año 2008



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (5)



1.2.2 Generación

El crecimiento acelerado del volumen de RSU generados trae consigo consecuencias como la dificultad para su recolección, y el agotamiento de la vida útil de los rellenos sanitarios. Utilizando las proyecciones de población de CONAPO e información de la generación per cápita de residuos sólidos proporcionada por SEMARNAT se ha estimado una tasa de crecimiento anual de generación de RSU en el Distrito Federal de 0.84 % con lo que se ha proyectado la generación de RSU al año 2020.

Conforme a lo mostrado en la tabla 1 se observa que la generación en el año 2010 será de 13,066 ton/día de RSU aumentando en un 8.8% para el año 2020, en el que la generación será de 14,215 ton/día.

Tabla 1. Estimación de la generación de RSU

Año	Población	Generación de residuos anual (ton)	Generación diaria de RSU (ton)	Generación per cápita (kg/hab/día)
2007	8,829,423	4,650,100	12,740	1.44
2008	8,836,045	4,689,458	12,848	1.45
2009	8,841,916	4,729,148	12,957	1.47
2010	8,846,752	4,769,175	13,066	1.48
2011	8,850,343	4,809,540	13,177	1.49
2012	8,852,475	4,850,247	13,288	1.50
2013	8,853,026	4,891,299	13,401	1.51
2014	8,851,876	4,932,698	13,514	1.53
2015	8,848,995	4,974,448	13,629	1.54
2016	8,844,430	5,016,550	13,744	1.55
2017	8,838,221	5,059,009	13,860	1.57
2018	8,830,217	5,101,828	13,978	1.58
2019	8,820,282	5,145,009	14,096	1.60
2020	8,808,410	5,188,555	14,215	1.61

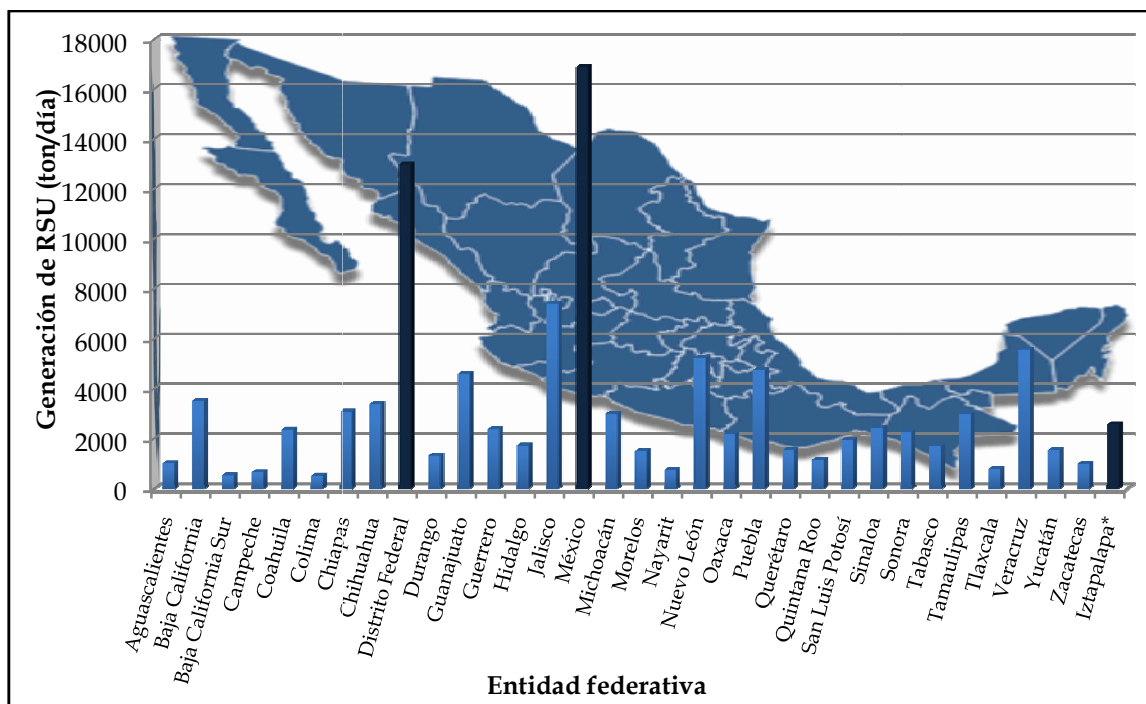
Fuente Elaboración propia con información de (2),(6) y (7)



Situación actual del manejo y generación de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal

En relación a la dinámica de generación de RSU en las distintas delegaciones del Distrito Federal, de las 16 que lo conforma la que más residuos genera es Iztapalapa contabilizándose 2,584 toneladas al día de residuos en el año 2008(8), superando esta cifra la generación diaria de estados como Aguascalientes, Durango, Tlaxcala, entre otras (ver Gráfico 1); contribuyendo en un 19.7 % con la generación total de residuos en el Distrito Federal en ese año, por otro lado, la delegación que menos RSU generó fue Milpa Alta con 102 toneladas diarias (ver Gráfico 2). Esta diferencia tan marcada de generación de RSU se debe a factores tales como: cantidad de población en cada delegación, grado de industrialización y actividades de comercio que allí se desempeñan. En el Gráfico 2 se muestra la generación de RSU por día para cada Delegación, de acuerdo al *Inventario de Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal 2008*.

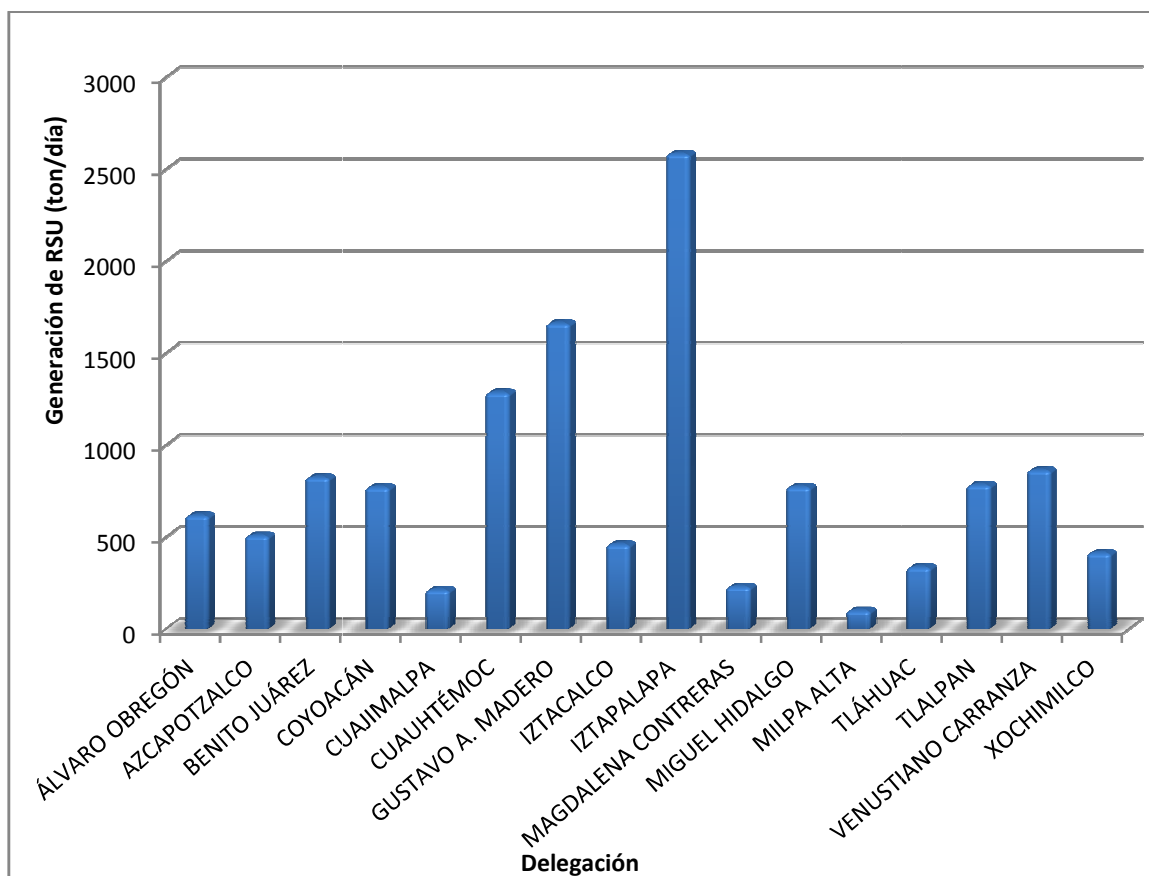
Gráfico 1. Generación de RSU por entidad en el año 2008



Fuente: Elaboración propia a partir de (9)



Gráfico 2. Generación de RSU por delegación en el D.F. en el año 2008

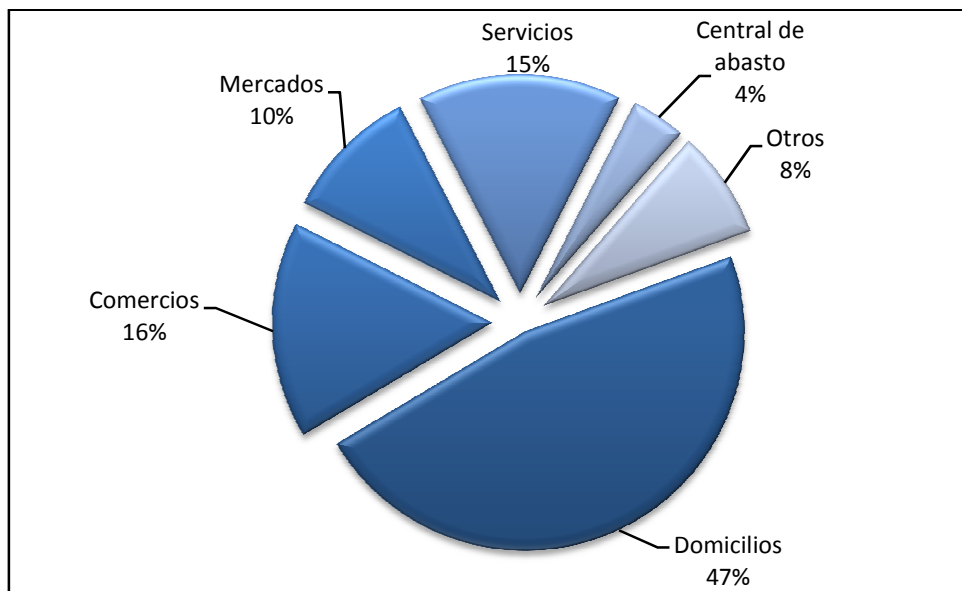


Fuente: Elaboración propia a partir de (7)

De acuerdo con el segundo informe de trabajo de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, dado a conocer en octubre de 2008, la composición de los residuos en la ciudad de México es de aproximadamente 60% de tipo inorgánico y 40% de tipo orgánico. Las principales fuentes de origen de los RSU son los domicilios (47%), los comercios (16%), los mercados (10%), los servicios (15%) y la central de abasto (4%) (Ver Gráfico 3).



Gráfico 3. Composición porcentual de generadores de RSU en el Distrito Federal



Fuente: Elaboración propia a partir de (7)

1.2.3 Recolección

El servicio de limpia, recolección y transporte de los RSU recolectados hacía las estaciones de transferencia (ET) es responsabilidad de cada una de las 16 delegaciones políticas del D.F., la recolección de parada fija es el servicio común de recolección doméstica que se efectúa en las calles del D.F., es decir, el propietario de la casa es el responsable de llevar sus residuos hasta el camión recolector, el cual cuenta con puntos de recolección preestablecidos, y entregarlos. El servicio se lleva a cabo mediante camiones que, para cumplir con lo reglamentado en la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal², deberían de contar con un doble compartimiento, separando los residuos orgánicos de los

² La Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal fue publicada en abril del 2003 en el Diario Oficial de la Federación y entró en vigor en febrero de 2004. El reglamento dicha ley se publicó el día 07 de octubre de 2008 en la gaceta oficial del DF y entró en vigor el 02 de enero de 2009, de éste se desprenden las siguientes obligaciones y sanciones:

A) Responsabilidad de toda persona física o moral de separar, reducir y evitar la generación de residuos sólidos. B) Fomentar la reutilización y reciclaje de residuos sólidos. C) Barrer diariamente las banquetas de viviendas y establecimientos mercantiles en general, manteniéndolos libres de residuos sólidos. D) Se prohíbe mezclar residuos peligrosos con residuos sólidos e industriales no peligrosos. E) Los generadores de alto volumen de residuos sólidos deberán implementar un plan de manejo.



inorgánicos, pero para el 2008, de los 2,485 camiones recolectores sólo el 7% cumplían con esta condición(10), haciendo más compleja la tarea de separación en fuente.



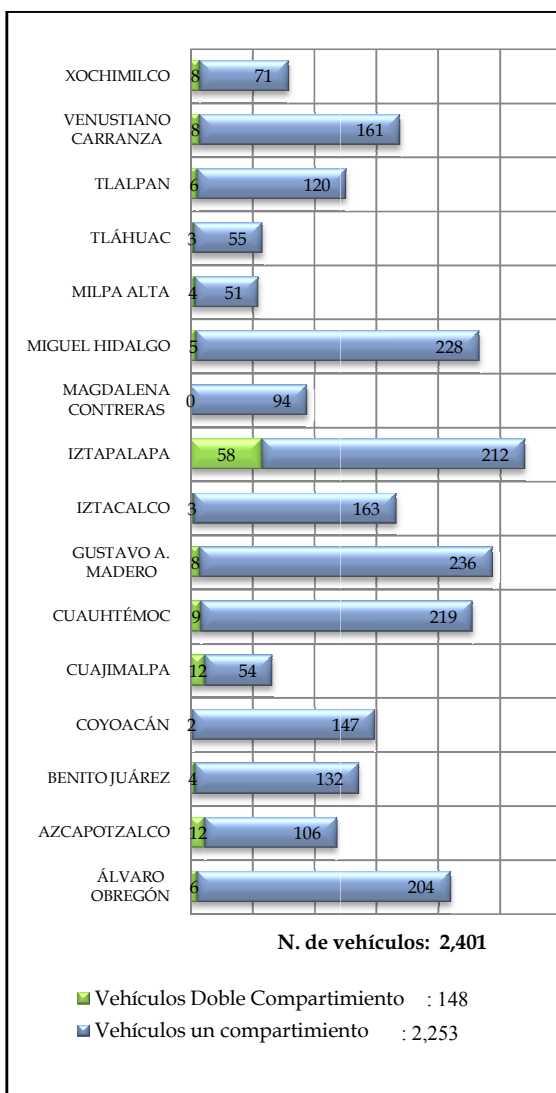
Las fotos muestran los distintos tipos de camiones de recolección que se utilizan para la recolección de los residuos en el D.F.

En el Gráfico 4 y el Gráfico 5 se muestra el número de camiones por delegación con uno y dos compartimientos reportados para los años 2007 y 2008. De los gráficos se observa que, aunque el número de vehículos para realizar la recolección ha aumentado en un 3.3%, todavía se encuentra rezagada la adquisición de camiones con doble compartimiento. En el año 2008 se recolectaron 10,853 toneladas de residuos al día (10) lo que corresponde a una eficiencia de recolección, en comparación con la generación, de 86%, encontrándose el servicio en el límite del mínimo recomendado por la OPS que es de 85 %. Lo que indica que es necesario tomar acciones para incrementar la eficiencia de recolección lo que evita la aparición de tiraderos clandestinos y con esto la generación de vectores infecciosos perjudiciales para la sociedad.



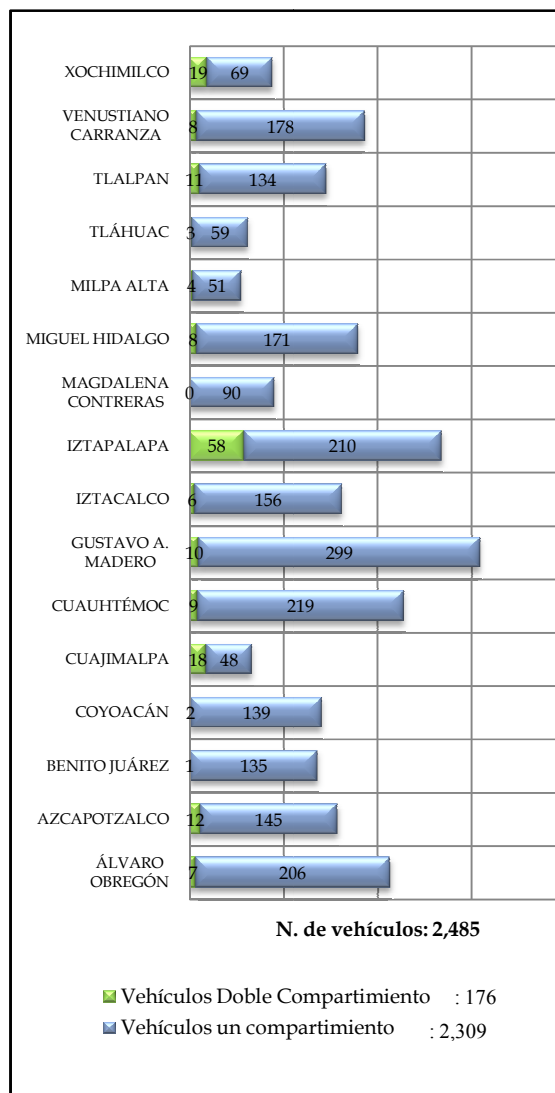
Situación actual del manejo y generación de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal

Gráfico 4. Vehículos recolectores de residuos sólidos urbanos del Distrito Federal por Delegación en el año 2007



Fuente: Elaboración propia a partir de(6)

Gráfico 5. Vehículos recolectores de residuos sólidos urbanos del Distrito Federal por Delegación en el año 2008



Fuente: Elaboración propia a partir de(7)



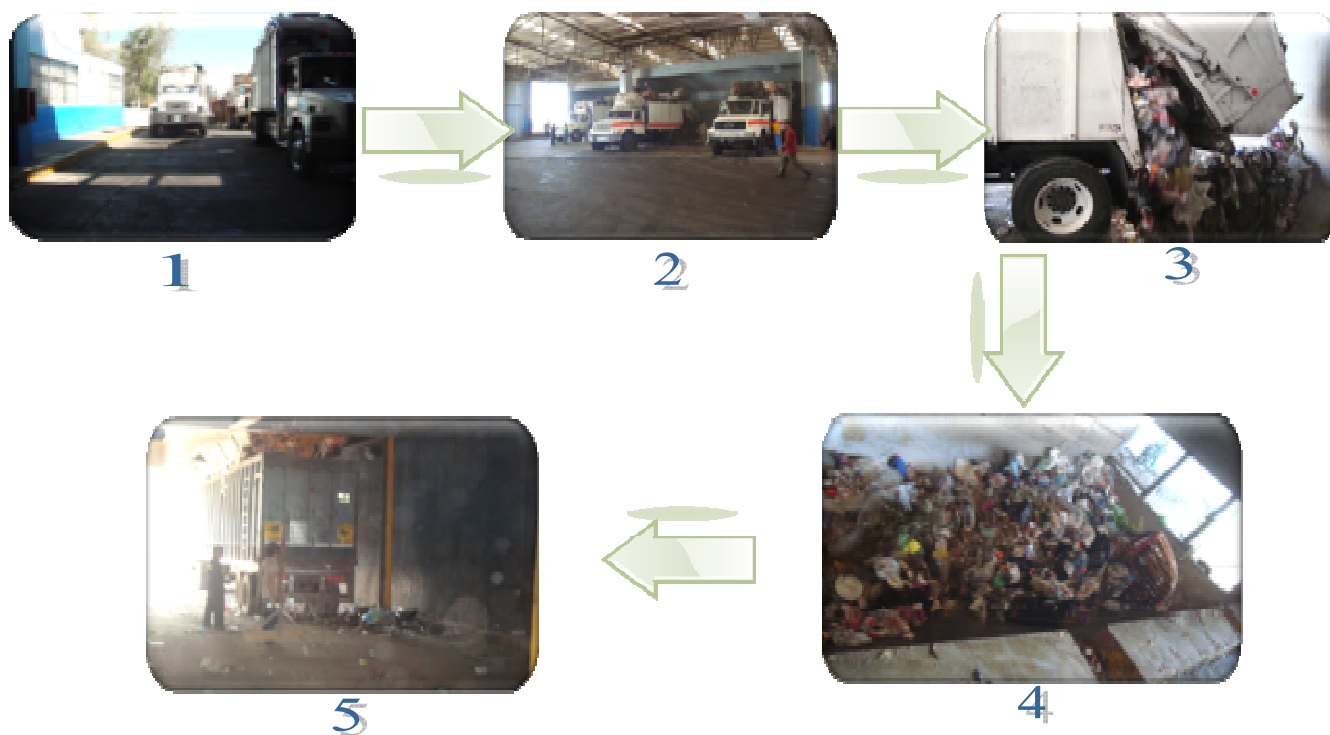
1.2.4 *Transferencia*

La etapa de transferencia es el punto de bifurcación de los RSU hacía las plantas de selección, de composta y hacía el sitio de disposición final. La función de una estación de transferencia (ET) es mejorar la eficiencia del servicio de recolección, reduciendo el número de viajes y el tiempo de traslado de los vehículos de recolección al sitio de disposición final.

En el Distrito Federal existen 13 estaciones de transferencia que concentran los RSU provenientes de la recolección pública y privada, ubicadas en doce delegaciones políticas bajo un radio de influencia de 7 km cada una cuya operación y mantenimiento es responsabilidad de la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU), y en algunos casos, es responsabilidad conjunta con la Delegación en la que se localiza. El proceso de transferencia se inicia con el ingreso del camión recolector hacía la báscula para determinar la cantidad de RSU recibida [1], posteriormente se le asigna una zona de vaciado (tolva) [2] para transferir los RSU hacía los vehículos tipo tráiler o tracto camión [3], una vez llenos se realiza el despunte (acomodo y remoción de los residuos en la superficie del transfer) para posteriormente colocar una lona que cubra los residuos y así evitar que se dispersen en el traslado [5] (ver Figura 4).



Figura 4. Proceso de transferencia de residuos



Fuente: Elaboración propia

La cantidad total de tracto camiones actual es de 238, los cuales no cuentan con un sistema eficiente de compactación, lo cual aumentaría la eficiencia de residuos transportados por viaje realizado. Los tracto camiones son propiedad de particulares contratados por la DGSU. La Figura 5 ilustra la ubicación de cada una de las instalaciones.



Figura 5. Ubicación de las estaciones de transferencia del D.F.



Fuente: Elaboración propia a partir de (10)

Etiqueta	Estación de transferencia
ET1	Gustavo A. Madero
ET2	Azcapotzalco
ET3	Venustiano Carranza
ET4	Cuauhtémoc
ET5	Miguel Hidalgo
ET6	Benito Juárez
ET7	Alvaro Obregón
ET8	Coyoacán
ET9	Iztapalapa I
ET10	Iztapalapa II (central de abasto)
ET11	Xochimilco
ET12	Tlalpan
ET13	Milpa Alta



Cabe hacer mención que derivado del plan de separación de RSU del D.F. algunas estaciones de transferencia cuentan con tolvas exclusivas para recibir residuos orgánicos (ver fotografía 1) pero, debido a una logística inadecuada de recolección-transferencia de residuos separados, las tolvas destinadas para residuos orgánicos son rara vez utilizadas para este fin.

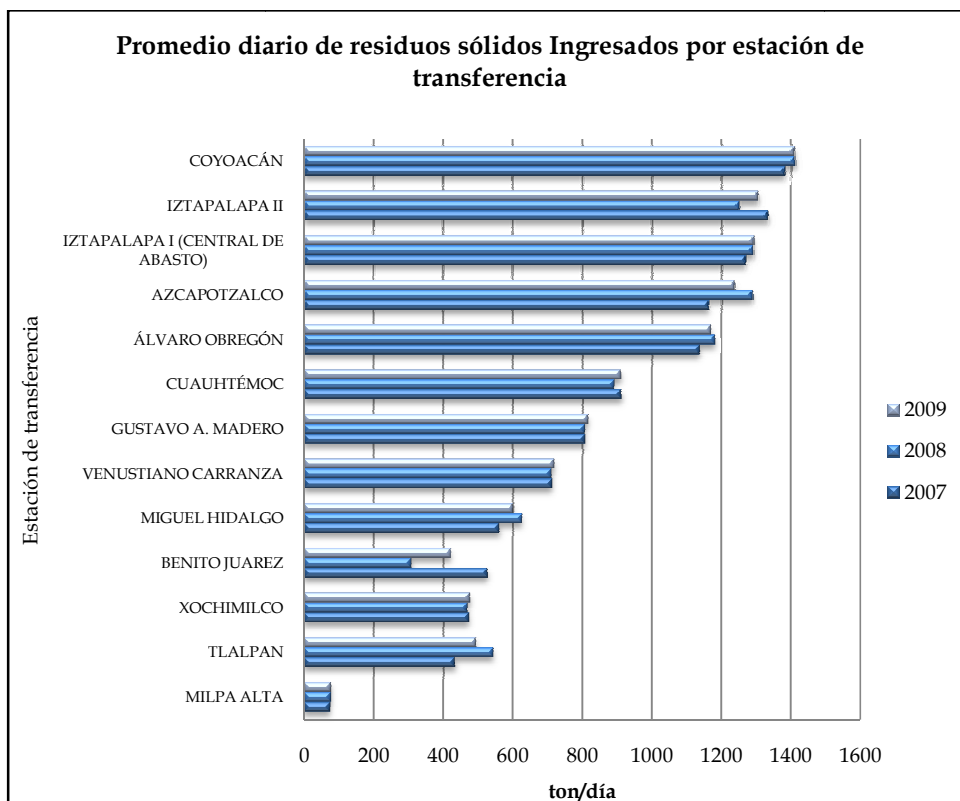


Fotografía 1. Tolvas de orgánicos (izquierda) e inorgánicos (derecha) en estación de transferencia

De acuerdo a la información de los inventarios de residuos sólidos del Distrito Federal 2007 y 2008 se observa que la cantidad de residuos transferidos no ha aumentado sustancialmente. Se ha estimado que en el 2009 se transfirieron 10,927 toneladas al día de residuos y de continuar la tendencia observada en el Gráfico 6 se estima que en el año 2010 se transferirán 10,977 toneladas diarias.



Gráfico 6. Residuos sólidos ingresados a las estaciones de transferencia años 2007 a 2009

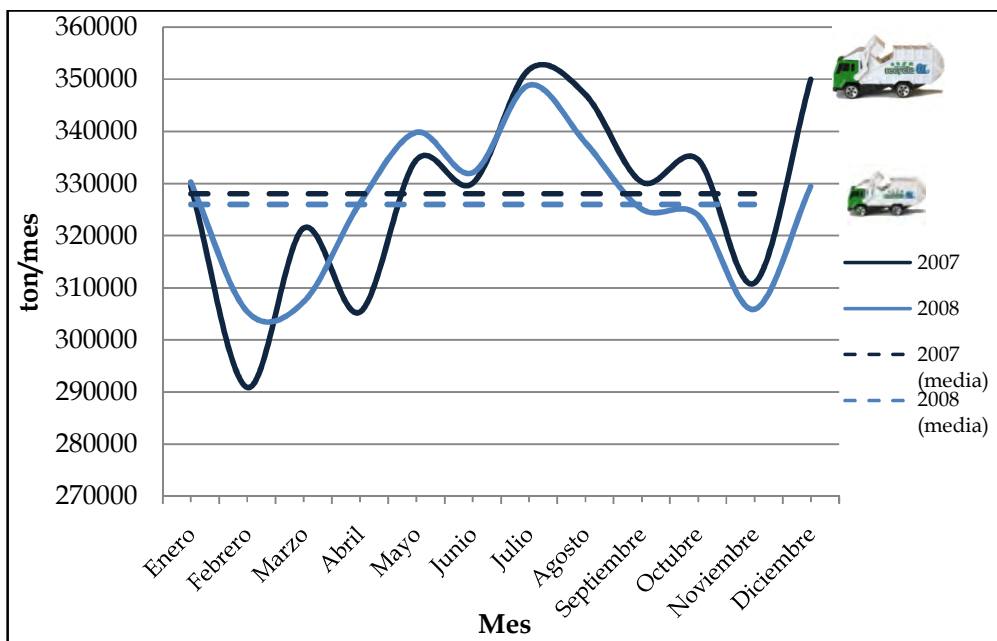


Fuente: Elaboración propia a partir de (10)

Debido a que las estaciones de transferencia son el punto de bifurcación de los residuos, es en éstas en donde se observa claramente el efecto de la estacionalidad en la generación de residuos, como se muestra en el Gráfico 7 en los meses de julio y diciembre existe un incremento de hasta el 7 % en la generación.



Gráfico 7. Comportamiento global de los RS ingresados mensualmente a las Estaciones de Transferencia



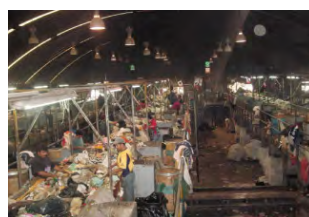
Fuente: Elaboración propia a partir de (6) y (7)

1.2.5 Recuperación y tratamiento

La etapa de recuperación dentro del manejo de los residuos en el Distrito Federal se lleva a cabo mediante tres plantas de selección en las que los materiales que son susceptibles de reciclaje, tales como papel, cartón, vidrio, plástico, metales, textiles, madera, aparatos electrónicos y resinas son recuperados. Estas plantas de selección fueron construidas principalmente para que la actividad de reciclaje se llevara a cabo de una forma más segura que a cielo abierto como se hacía anteriormente en los rellenos sanitarios.



Segregación de los residuos sin plantas de selección



Segregación de los residuos con plantas de selección



Estas plantas son conocidas como Planta de selección Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina por encontrarse en esa ubicación (ver Figura 6). En conjunto integran una capacidad instalada para el procesamiento de 6,500 toneladas al día de residuos con horarios de operación de 22 horas al día. El proceso de selección está integrado por una sección de bandas transportadoras en las que se realiza una selección manual por parte de selectores y un equipo mecánico de separación magnética.

Figura 6. Ubicación de las plantas de selección del Distrito Federal



Fuente: Elaboración propia



En la tabla 2 se muestran otras características de las plantas de selección, cabe destacar de esta información que las plantas de selección Bordo Poniente y San Juan de Aragón agotaron su vida útil en el año 2009.

Tabla 2. Características generales de las plantas de selección del Distrito Federal

Rubro	Bordo Poniente	San Juan de Aragón	Santa Catarina
Puesta en marcha	Julio 1994	Julio 1994	Marzo 1996
Capacidad (ton/día)	2,000	2,000	2,500
Operación (h/día)	22	22	22
Líneas de proceso	4 líneas	4 líneas	5 líneas
Personal en línea	56	76	75
Longitud del transportador (m)	50	65	65
Terreno (m2)	37,000	34,000	35,000
Velocidad de operación (min)	18-25	18-25	18-25
Vida útil (años)	15	15	15
Vida útil restante (años)	0	0	2
Destino de material de rechazo	Sitio de disposición final	Sitio de disposición final	Sitio de disposición final

Fuente: Elaboración propia a partir de (11)

En conjunto las tres plantas de selección reciben diariamente en promedio (periodo 2006-2008) 4,295 toneladas de residuos lo que significa que sólo está utilizando el 66% de la capacidad total instalada. El 46.5% de los residuos que se reciben en las plantas de selección proviene de las estaciones de transferencia del Distrito Federal y el resto de la recolección y particulares del estado de México.

La cantidad recuperada de residuos a partir de la selección no supera el 6% del total de residuos ingresados, y la máxima cantidad de recuperación de residuos se realiza (como se muestra en la Tabla 3) en la planta de selección de San Juan de Aragón con un máximo de recuperación en el periodo 2006 a 2008 de 8%, esto se muestra en el Gráfico 8, el Gráfico 9 y el Gráfico 10 en donde se



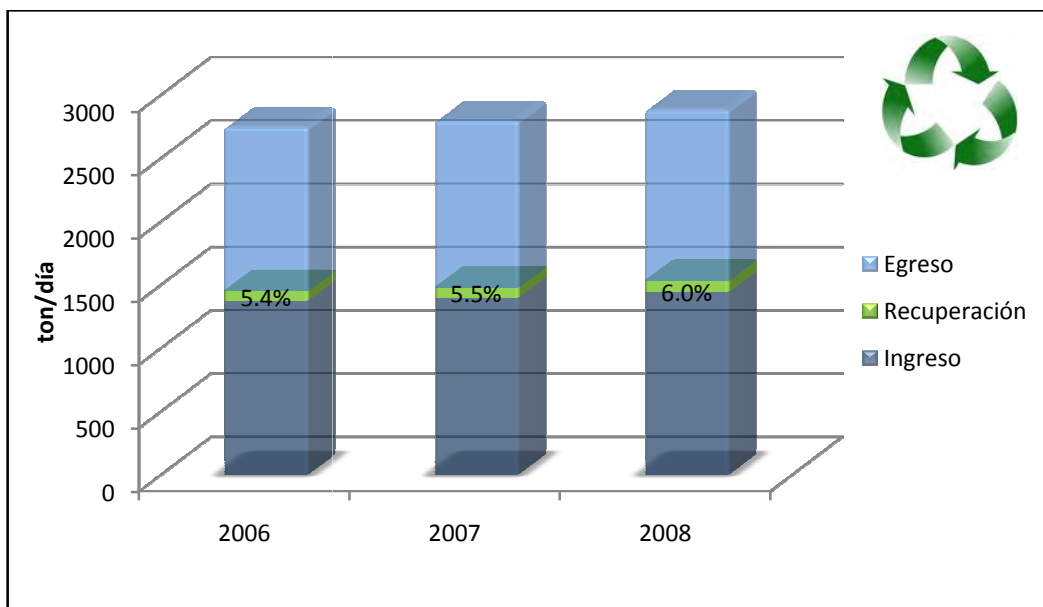
comparan las cantidades de ingreso, recuperación y egreso (rechazo) de los residuos en las plantas de selección en el periodo 2006-2008

Tabla 3. Promedio diario (en toneladas) de los residuos que ingresaron, recuperaron y egresaron en plantas de selección periodo 2006-2008

Planta	Actividad	2006	2007	2008
Bordo Poniente	Ingreso	1,374	1,400	1,442
	Recuperación	74	77	87
	Egreso	1,300	1,322	1,355
	% Recuperación	5.4	5.5	6.0
San Juan de Aragón	Ingreso	1,425	1,394	1,537
	Recuperación	99	112	113
	Egreso	1,326	1,281	1,425
	% Recuperación	7.0	8.1	7.3
Santa Catarina	Ingreso	1,345	1,319	1,647
	Recuperación	61	78	95
	Egreso	1,284	1,242	1,552
	% Recuperación	5.0	6.0	6.0
Total	Ingreso	4,144	4,113	4,627
	Recuperación	235	267	295
	Egreso	3,909	3,845	4,332
	% Recuperación	5.7	6.5	6.4
	Promedio de recepción (2006-2008)			4,295

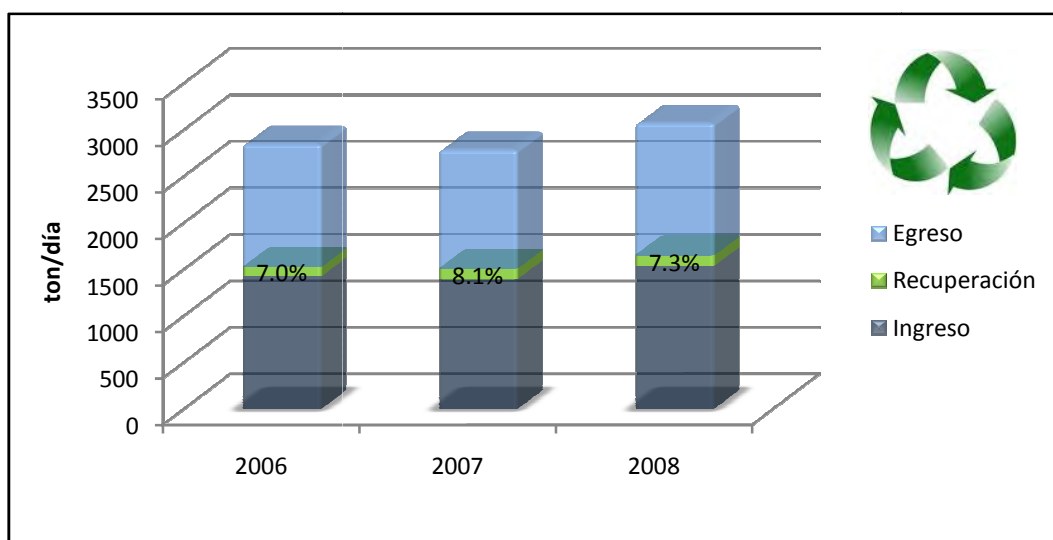


Gráfico 8. Promedio diario (en toneladas) de los residuos que ingresaron, recuperaron y egresaron en plantas de selección Bordo Poniente en el periodo 2006-2008



Fuente: Elaboración propia

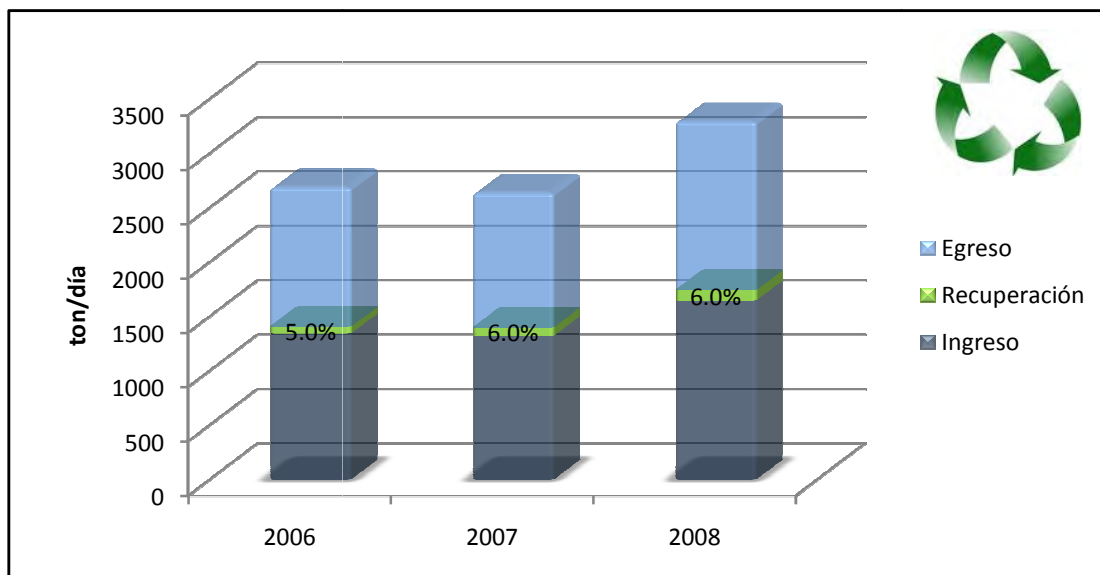
Gráfico 9. Promedio diario (en toneladas) de los residuos que ingresaron, recuperaron y egresaron en plantas de selección San Juan de Aragón en el periodo 2006-2008



Fuente: Elaboración propia



Gráfico 10. Promedio diario (en toneladas) de los residuos que ingresaron, recuperaron y egresaron en plantas de selección Santa Catarina en el periodo 2006-2008



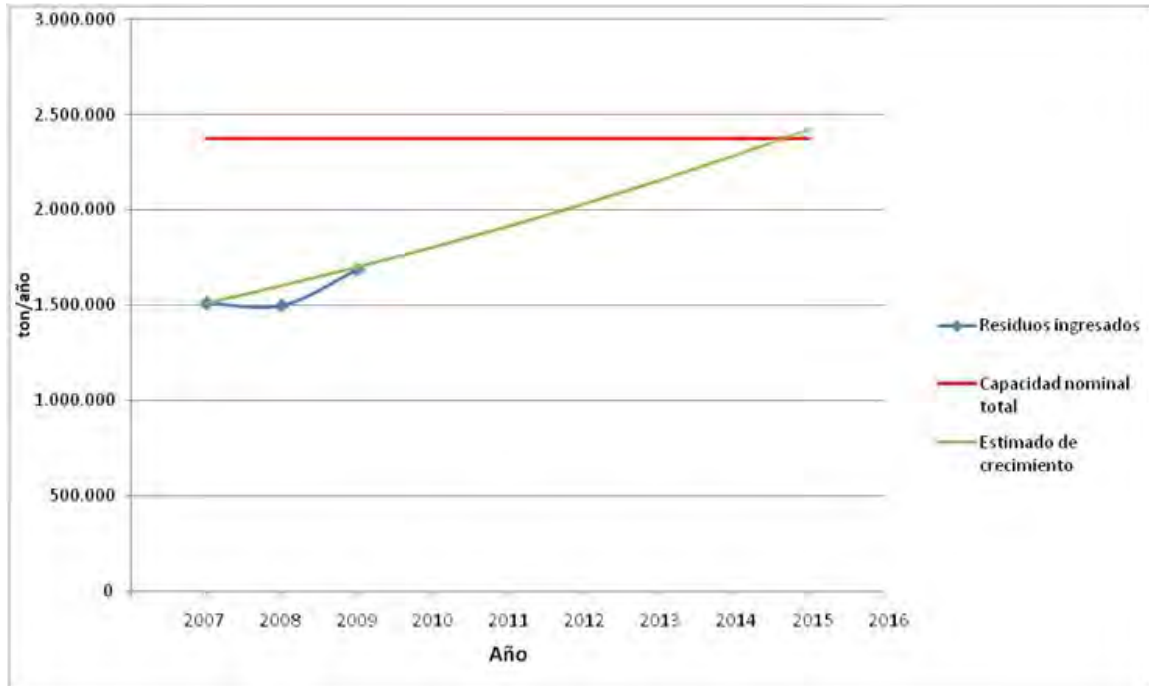
Fuente: Elaboración propia

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, si no a la demanda solicitada por las plantas de selección.

De acuerdo con la información de los inventarios de RS del D.F. de los años 2007 a 2008 se estimó que la tasa de crecimiento anual de recepción de residuos en las plantas de selección es de 6%. Suponiendo que se siga esta tendencia la cantidad de residuos recibida para el año 2009 se estima de 4,945 toneladas diarias, incrementándose año con año, hasta el 2014 año en que las plantas estarán operando a su máxima capacidad.



Gráfico 11. Estimación de la recepción total promedio de residuos en las plantas de selección



Fuente: Elaboración propia



1.2.6 Tratamiento de residuos

Actualmente en el Distrito Federal, el único tratamiento que se le da a los residuos es el compostaje de la fracción orgánica (residuos de poda, excretas de ganado, residuos de comida, entre otros) el cual se realiza a través de las 9 plantas de composta con que cuenta el D.F. en las que se procesa la fracción orgánica para su aprovechamiento como mejorador de suelos de terrenos agrícolas, áreas verdes, viveros, parques, camellones y glorietas.

La capacidad total instalada para el tratamiento de los residuos es de apenas 220 toneladas diarias pero sólo se está utilizando el 50 % de la capacidad, tratando apenas el 18 % de los residuos orgánicos separados, aunado a esto en las plantas se logra en promedio una conversión (composta producida/ingreso total de residuos orgánicos) de apenas un 29 % lo que refleja un gran déficit en sistemas eficientes de tratamiento de residuos.

En la tabla 4 se muestran las características generales de las plantas de composta ubicadas en el Distrito Federal, además se incluye la cantidad de residuos ingresada, de composta producida y el porcentaje de conversión reportado para el año 2008, observándose que la planta de Bordo Poniente es la que trata la mayor cantidad de residuos orgánicos, recibiendo alrededor de 88 toneladas diarias cuyo origen principal son las estaciones de transferencia, mientras que las plantas restantes tratan la fracción correspondiente a los residuos orgánicos de las áreas verdes de las delegaciones



Tabla 4. Características y flujo de residuos en las plantas de composta del D.F.

Características generales de las plantas de composta existentes							
Planta de composta	Capacidad instalada (ton/día)	Ingreso total (ton/día)	Composta producida (ton/día)	Porcentaje de conversión	Tipo de proceso	Origen de los residuos	Ubicación
Bordo Poniente	200	88	22	25	Pilas aerobias	Estaciones de transferencia Privados Entidades públicas DGSU Planta bordo poniente	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	220	104	30	29			

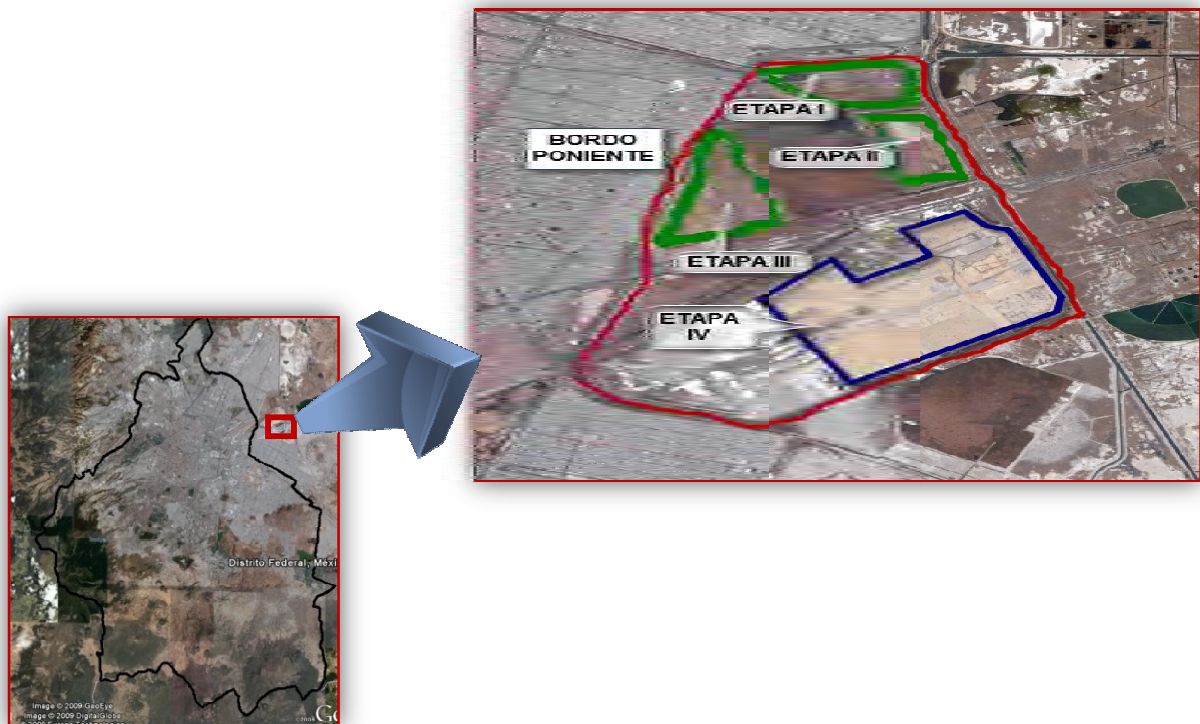
Fuente: Elaboración propia a partir de (5)



1.2.7 Disposición final

La última etapa del manejo de los residuos sólidos en el Distrito Federal es la disposición final, la cual está a cargo de la Dirección General de Servicios Urbanos. En la ciudad de México sólo se cuenta con un sitio para la disposición final: el *Relleno Sanitario Bordo Poniente*, ubicado al nororiente de la Ciudad de México y al suroeste del antiguo lago de Texcoco. Para su operación se dividió en cuatro etapas (ver Figura 7), de las cuales las tres primeras, operadas a partir de 1985 y hasta 1993, sumaron una superficie efectiva acumulada de 249 hectáreas; estas tres primeras etapas ya han culminado su vida útil. La etapa IV inició su operación a principios de 1994 y cuenta con una superficie de 472 hectáreas que significan un pasivo ambiental correspondiente al 65 % del tamaño de Ciudad Universitaria y en donde se podrían plantar cerca de 295,000 árboles.

Figura 7. Ubicación del relleno sanitario Bordo Poniente y etapas que lo conforman.





Se estima que en total el relleno tiene actualmente 56 millones de toneladas de residuos sólidos que se han acumulado a lo largo de su vida útil. De acuerdo con información de la Secretaría de Obras y Servicios (SOS) de la DGSU, la compactación de los residuos que se disponen en el relleno sanitario es de 900 kg a 1 tonelada por cada metro cúbico y la altura de las celdas es de 8.5 m. Acorde a esta información se calculó que el relleno sanitario tiene una capacidad de 40,120,000 toneladas, por lo que es evidente que ya se ha sobrepasado la capacidad del relleno, con lo cual se ha hecho inminente la necesidad de clausurarlo.

A continuación se muestra, por tipo de origen, el promedio anual del ingreso diario de residuos sólidos con características de urbanos que ingresaron al bordo poniente en el periodo de 2006 a 2008.

Tabla 1. Promedio anual de ingreso diario (ton/día) en el relleno sanitario Bordo Poniente (2006-2008)

Origen	2006	2007	2008
Residuos sólidos provenientes de estaciones de transferencia	7,289	12,700	9,017
Residuos sólidos provenientes de plantas de selección	3,319		4,332
Ingreso diario de residuos sólidos provenientes de delegaciones, pago de derechos a Tesorería, oficios de autorización y empresas que trabajan a DGSU	85	114	52
Otros*	1,297	--	--
Ingreso diario de residuos sólidos	11,990	12,814	13,401

Fuente: Referencias (12) y (5)

Como se puede observar la mayor parte de los residuos que son recibidos en el sitio de disposición final provienen de las estaciones de transferencia. El ingreso



diario aumentó en un 10.5 % del año 2006 a 2008 pasando de 11,990 a 13,401 toneladas al día, a pesar de que la vida útil del relleno sanitario bordo poniente ha llegado a su fin, la cantidad de residuos sólidos urbanos que son recibidas sigue aumentando, cuestión que debería ser completamente contraria, ya que al disminuir paulatinamente la cantidad de residuos enviada a bordo poniente podrían comenzarse a clausurar el sitio. La causa principal de que se mantenga aun en operación el relleno sanitario es la falta de una alternativa que resuelva la problemática.

i. Revisión cronológica del cierre del bordo poniente

A principios del año 2004, el gobierno capitalino invirtió aproximadamente \$17,500,000 M.N. para ampliar la capacidad del relleno sanitario Bordo Poniente y adecuarlo para la recepción de residuos sólidos, en septiembre de ese mismo año, cuando el relleno ya tenía 8 metros de altura al centro, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) otorgó la autorización para prolongar el tiempo de operación del sitio de disposición, mediante el incremento de la altura de las celdas de residuos en 4 metros en su periferia y 7 metros en el centro, logrando extender su vida útil por un periodo de 3.85 años en dos fases (septiembre 2004 a septiembre 2006 y de septiembre 2006 a junio de 2008)(13). Para Julio del año 2008, fecha en que se cumplía el plazo de 3.85 años para el cierre del bordo poniente, aún no se contaba con un nuevo sitio para la disposición final de los residuos, aunque ya se había presentado un año atrás la propuesta de la creación de un “Centro Integral de Reciclado y Energía” (CIRE), como solución al problema. Por lo anterior, se reprogramó la fecha del cierre para el 30 de noviembre de ese mismo año, para lo cual la SEMARNAT tomó la decisión de que a partir del mes de septiembre sólo se permitiera que se depositaran en dicho relleno un máximo de nueve mil toneladas diarias de residuos; en octubre seis mil, y en noviembre únicamente tres mil, para proceder así a su clausura definitiva, ya que el peso de la basura compactada había provocado hundimientos de 14 hasta 21 metros, aumentando el riesgo de que la



geomembrana, que cubre la superficie del relleno sanitario, se rompiera y contaminara los mantos acuíferos con los lixiviados generados, lo que pondría en riesgo la salud de la población (14) .

El 19 de agosto de 2008, la SEMARNAT extendió una nueva prórroga al Distrito Federal, y decidió que la clausura definitiva se realizara en enero de 2009 y no en noviembre como se había planeado, tomando en cuenta el argumento presentado por el Gobierno del Distrito Federal (GDF), fundamentado en el incremento de generación de residuos sólidos en los meses de diciembre y enero, aumentando en un 20% con respecto al resto del año, quedando así la fecha de cierre definitivo para el 15 de enero de 2009. Las condicionantes impuestas fueron que a partir de esa fecha tres de las ocho macro celdas que conforman el polígono quedarían imposibilitadas para seguir recibiendo residuos, señalando que no habría más prórrogas debido al riesgo inminente de la rotura de la geomembrana por el peso de la basura, y que la clausura se haría de manera gradual, y conforme lo establece la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003(15).

Llegado el 15 de enero de 2009, el gobierno capitalino obtuvo una suspensión provisional por parte del Tribunal Federal de Justicia Fiscal y Administrativa, que dejó sin efectos jurídicos la fecha de clausura, razón por la cual se ha mantenido en operación el relleno sanitario Bordo Poniente.

Una opción que el gobierno capitalino ha estudiado es la posibilidad de enviar los residuos generados hacia sitios de disposición del Estado de México, lo que representaría un gasto diario aproximado de un millón 440 mil pesos(16), opción que a la fecha no se ha llevado a cabo. Otra alternativa del Gobierno del Distrito Federal es utilizar 150 hectáreas más del Bordo Poniente para seguir depositando residuos, aumentando la altura de 15 a 17 metros; otra opción sería la construcción de un CIRE.

El presupuesto que la administración capitalina tiene asignado para el proceso de cierre de operaciones del relleno sanitario suma un total de 17 millones 372 mil 986 pesos; sin embargo, los técnicos de obras refieren que se necesitan



cerca de 290 millones de pesos como inversión mínima, sólo para llevar a cabo el cierre adecuado(17).

Con respecto a lo citado anteriormente, es evidente que el cierre del relleno sanitario Bordo Poniente, el cual lleva planeándose desde el año 2004, sólo se ha postergado. Resultando en que el único relleno sanitario con el que cuenta la Ciudad de México sigue en funcionamiento a pesar de las graves consecuencias medioambientales y de salud pública que esto implica.



ii. Alternativas que han sido propuestas para minimizar el impacto de la disposición final de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal

Como una de las primeras acciones para minimizar la cantidad de residuos que llegan al Bordo Poniente, y para la reducción sustancial de los gases de efecto invernadero generados por el relleno, entró en vigor en febrero del año 2004 la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, y a partir del 1° de octubre de ese año la Secretaría del Medio Ambiente del gobierno del Distrito Federal estableció una coordinación permanente con la Secretaría de Obras y Servicios y con las dieciséis Delegaciones Políticas para poner en marcha el Programa General de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2004-2008, en la que una de las primeras acciones ha sido la educación ambiental con la ciudadanía para lograr el cumplimiento de la separación de los residuos en dos fracciones (orgánicos e inorgánicos)(18).

En la búsqueda de propuestas para el procesamiento de la basura generada en el Distrito federal, en septiembre de 2007 se llevó a cabo el Foro Metropolitano de Tratamiento de Desechos, donde se presentó la propuesta de la construcción de un “Centro Integral de Reciclaje y Energía” (CIRE), que es una de las acciones en materia de residuos del plan verde de la ciudad de México. Este CIRE, se proyecta como un complejo industrial donde del 100% de residuos que se ingresen un 20% será para reciclado, 20% destinado para composta, 45 % se convertirá en energía y la fracción de rechazo y con poco aprovechamiento energético se compactará para ser plastificada, almacenada y posteriormente ser introducida al proceso térmico de conversión de energía(19).

De acuerdo con el Gobierno del Distrito Federal, se planea que el CIRE esté integrado por las siguientes áreas:



Situación actual del manejo y generación de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal

Tabla 5. Áreas de las que se conformará el CIRE, capacidades para cada planta, superficie requerida e inversión estimada

Clave	Descripción	Capacidad (ton/día)	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 biodigestores	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: Modificado de (20)

Como se observa en la Tabla 5, la construcción del CIRE se tiene considerada ser realizada con un 85% de inversión privada. El presupuesto asignado para la



planta de tratamiento térmico será de \$1,095,000,000 pesos M.N. De acuerdo a comunicados del GDF, la licitación será publicada una vez que se cierre el trato para la adquisición de los predios en que han estado trabajando la Oficialía Mayor, la Secretaría de Gobierno y la Comisión de Recursos Naturales de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA). Como parte del Fondo Metropolitano, se han asignados 170 millones para la compra de los terrenos(21).

Antes de la crisis económica, el gobierno del Distrito Federal tenía planeado construir cuatro de estos centros, sin embargo, actualmente sólo se estima edificar dos; uno en la Sierra de Santa Catarina, en Tláhuac, y otro en el interior del Bordo Poniente(22). Se ha informado que los trabajos de construcción comenzarán antes de Julio de 2009 y serán terminados a mediados del 2010, pero a la fecha no existe ni si quiera la licitación.

Otra propuesta para el tratamiento de RSU fue hecha en septiembre de 2007 por el Sindicato Mexicano de Electricistas que consistía en la gasificación de los residuos por arco de plasma, procesando 12,000 toneladas de residuos diarios coadyuvando en el combate a la contaminación ambiental y al mismo tiempo generando energía eléctrica, hidrógeno y gas, la cual tendría un costo de 250 millones de dólares(23).



1.3 Conclusiones del capítulo

El manejo actual de los residuos sólidos en el Distrito Federal presenta deficiencias, principalmente para llevar a cabo la implementación de lo indicado en el Reglamento de Residuos Sólidos del Distrito Federal en cuanto a la separación en fuente de los residuos orgánicos e inorgánicos, debido a la falta de infraestructura, a la baja participación de la ciudadanía, a la falta de común acuerdo con los prestadores del servicio y a la inadecuada logística de operación.

La cobertura del servicio de recolección es del 87 %, el cual es un intervalo adecuado de acuerdo al valor indicado por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) misma que señala como un intervalo aceptable del 85 al 100% de cobertura. El número de camiones estimado (tomando en cuenta una densidad de los residuos de 0.45 ton/m³, camiones de 7 m³ de capacidad y 2 turnos diarios) para la recolección de las 13,066 toneladas diarias de residuos generados proyectadas para el año 2010 es de 2,073 unidades. Por tanto, lo anterior señala que la infraestructura actual es adecuada en número, sin embargo, no lo es en su operación para satisfacer las necesidades reales de la población, ya que cerca del 25 % de los camiones utilizados para el servicio ya han agotado su tiempo de vida útil.

La cobertura del servicio de transferencia con relación a la recolección es prácticamente del 100%, es decir, que todos los residuos recolectados son llevados a las estaciones de transferencia, excepto por una pequeña fracción que es enviada directamente a plantas de composta, por tanto el servicio de transferencia presenta un alto índice de eficiencia. Como resultado de la coordinación de la administración y operación de las estaciones de transferencia entre las delegaciones y la DGSU del gobierno del D.F., se han evitado pugnas entre las delegaciones logrando una adecuada operación de las mismas.

En cuanto a la disposición final, se mostró que es necesario el cierre del bordo poniente, ya que ha rebasado su límite de almacenamiento, pero a falta de una



estrategia de solución por parte del gobierno del D.F. sólo se ha postergado la clausura del sitio, argumentando falta de sitios dentro del D.F. e insuficiencia de recursos económicos.

De acuerdo con lo mostrado en el capítulo el gasto diario del gobierno del D.F. por el manejo de sus residuos sólidos se estimó en \$4,934,245 pesos, que corresponden a un gasto anual de \$1,800,999,553 de pesos, adicional a lo que los usuarios del servicio dan como propinas que es alrededor de \$1,320,837,440 (tomando en cuenta \$10 pesos de propina por vivienda a la semana), acorde con esto ,si el gobierno regularizara el servicio y cobrara una tarifa de \$10 pesos por vivienda a la semana, podría ahorrarse hasta el 73 % del gasto. O cobrar \$13.63 por vivienda a la semana para cubrir el 100% del gasto.

Estos ahorros podrían traducirse en inversiones para nuevas tecnologías de manejo de los residuos, logrando dar una solución a la problemática actual del Distrito Federal.



2. Los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Federal como combustibles

Como se ha expuesto en el capítulo anterior, el Distrito Federal tiene al día de hoy un grave problema de generación y disposición de residuos sólidos urbanos; lo anterior, motivado por el incremento de la población, la urbanización y la carencia de espacios para la disposición final, en particular por el inminente cierre del único relleno sanitario que da servicio al Distrito Federal conocido como Bordo Poniente. En este contexto, la valorización energética mediante procesos de tratamiento térmico como los que se presentarán en este documento, proporciona una alternativa para la disminución del volumen de los residuos, con la consecuente conversión en energía.

La calidad de los RSU como combustible³ es función de la cantidad de energía, representada por el poder calorífico que contienen y que pueden liberar. El poder calorífico de un combustible es la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una cantidad unitaria de combustible y los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente, es decir, es igual al valor absoluto de la entalpía de combustión del combustible.

$$\text{Poder calorífico} = |\Delta h_c| [=] \frac{\text{kJ}}{\text{kg de combustible}}$$

El poder calorífico depende de la fase del agua en los productos; el poder calorífico superior (PCS) hace referencia a que el agua de los productos de combustión se encuentra en un estado líquido y el poder calorífico inferior (PCI) indica que el agua en los productos se encuentra en estado de vapor, este valor es de relevante importancia para llevar a cabo los cálculos de ingeniería, ya que normalmente los gases de combustión abandonan las instalaciones antes de alcanzar la temperatura de rocío del agua.

³ Material que, al combinarse con el oxígeno, se inflama con desprendimiento del calor

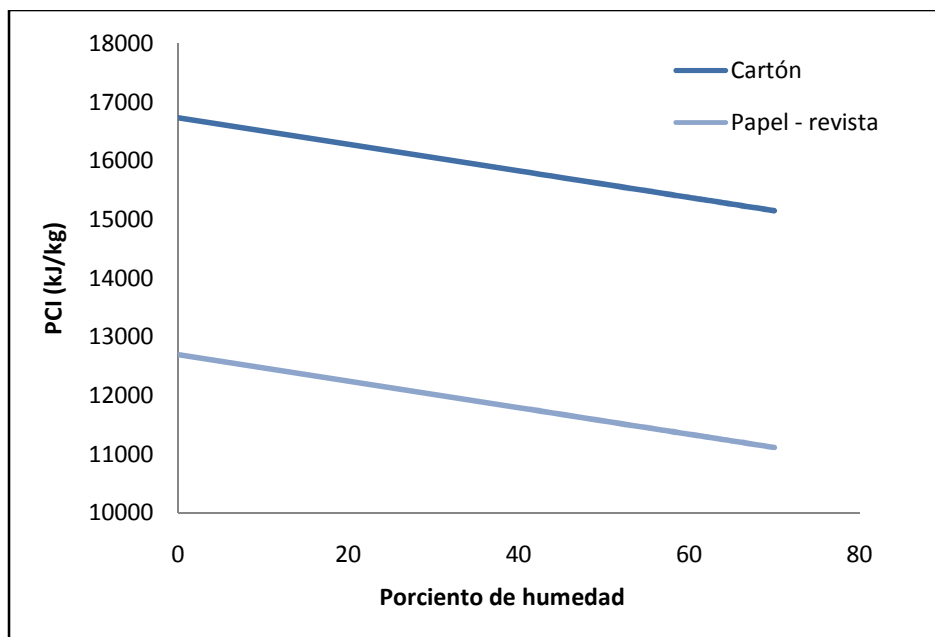


El PCS y el PCI se relacionan por medio de la siguiente ecuación:

$$PCS = PCI + (m\Delta h_{fg})_{H_2O}$$

Donde m representa la masa de agua en los productos por unidad de masa de combustible y Δh_{fg} es la entalpía de vaporización del agua a la temperatura especificada (24). Por consiguiente, el valor térmico más bajo es la cantidad de calor real disponible en el proceso de combustión para captarlo y utilizarlo. Cuanto mayor sea el contenido de humedad de un combustible, mayor será la diferencia entre el PCS y el PCI y menor será la energía total disponible, como se muestra en el Gráfico 12.

Gráfico 12. Efecto de la humedad sobre el poder calorífico



Fuente: Elaboración propia

También es posible determinar el PCS y el PCI considerando que el calor generado por el combustible es igual a la suma de los calores de combustión de los elementos simples que lo componen, restando el posible hidrógeno



consumido por el oxígeno del propio combustible, para formar agua (25), para el caso de los RSU, el cálculo del poder calorífico se realiza conociendo la composición de los mismos y utilizando alguna de las expresiones que han sido desarrolladas para tal fin, una de estas expresiones es la establecida por Brandt para sólidos y líquidos:

$$PCS= 34.8*C + 93.8*H + 10.44*S + 6.28*N - 10.8*O$$

$$PCI= 34.8*C + 93.8*H + 10.44*S + 6.28*N - 10.8*O - 2.5*W$$

En donde:

C, H, S, N y W es el contenido de carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno y agua, respectivamente (porcentaje en peso, kg/kg).

Las unidades de PCS y PCI se obtienen en MJ/kg de combustible(26).

2.1 Composición de los residuos sólidos urbanos

La composición de los RSU no es homogénea ya que depende en gran medida de los niveles y patrones de consumo, del poder adquisitivo de la población, de factores culturales, de dinámicas de movimiento; así como, de las prácticas de manejo y minimización de los residuos. Para el año de 19974 en la Ciudad de México poco menos de la mitad de los residuos sólidos eran de naturaleza orgánica, principalmente residuos de alimentos. En la Tabla 6 se muestra la distribución porcentual de la composición, correspondiendo el 60% a residuos sólidos inorgánicos como el papel (14.58%), cartón (5.36 %), vidrio (11%), plástico (11%), lata (1.58%) y otros diversos tipos de residuos.

⁴ A la fecha no se ha llevado a cabo una actualización de los datos de la composición de RSU en el Distrito Federal.



Tabla 6. Composición porcentual de los RSU del Distrito Federal

Componente	Porcentaje
Residuos de alimentos	34.66
Papel	14.58
Otros	10.41
Vidrio transparente	6.77
Plástico película	6.24
Cartón	5.36
Residuos de jardinería	5.12
Plástico rígido	4.33
Vidrio de color	4
Pañal desechable	3.37
Lata	1.58
Material ferroso	1.39
Residuos finos	1.21
Trapo	0.64
Hule	0.2
Hueso	0.08
Material no ferroso	0.06

Fuente: Elaboración propia a partir de (27)

De acuerdo a estudios anteriores, la composición de los RSU durante el periodo 1991 a 1997 muestra un incremento importante en productos desechables como plástico, papel y vidrio, mientras que en los residuos orgánicos ha tenido un decremento del 7.62% (27).

2.2 Contenido energético de los RSU

A partir de la ecuación de Brandt y utilizando valores de análisis elemental y contenido de humedad característicos obtenido de (28) y mostrados en la Tabla 7, se ha calculado el poder calorífico de las diferentes fracciones que componen los RSU del Distrito Federal (ver Gráfico 13).



Tabla 7. Datos típicos sobre el análisis elemental y humedad de las diferentes fracciones presentes en los RSU del D.F.

Componente	% de humedad	% Análisis en base seca					
		Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Cartón	5	43	5.9	44.8	0.3	0.2	5.8
Residuos finos	32	26.3	3	2	0.5	0.2	68
Hueso	25	40.4	6.4	16.2	7.8	0.5	28.7
Hule	2	54.26	5.69	0	0	0	
Lata	3	NA	NA	NA	NA	NA	90.5
Material ferroso ^a	2	4.5	0.6	4.3	0.1		90.5
Material no ferroso ^a	2	4.5	0.6	4.3	0.1		90.5
Papel	6	43.4	5.8	44.3	0.3	0.2	6
Pañal desechable ^b	80	44.47	8.53	46			0.24
Plástico película	0.2	60	7.2	22.8			10
Plástico rígido	0.2	60	7.2	22.8			10
Residuos de alimentos	70	48	6.4	37.6	2.6	0.4	5
Residuos de jardinería	60	46	6	38	3.4	0.3	6.3
Trapo	10	55	6.6	31.15	4.6	0.15	2.5
Vidrio de color ^a	2	0.5	0.1	0.4	0.1		98.9
Vidrio transparente ^a	2	0.5	0.1	0.4	0.1		98.9
Otros	60	26.3	3	2	0.5	0.2	68
Total %	38.21						

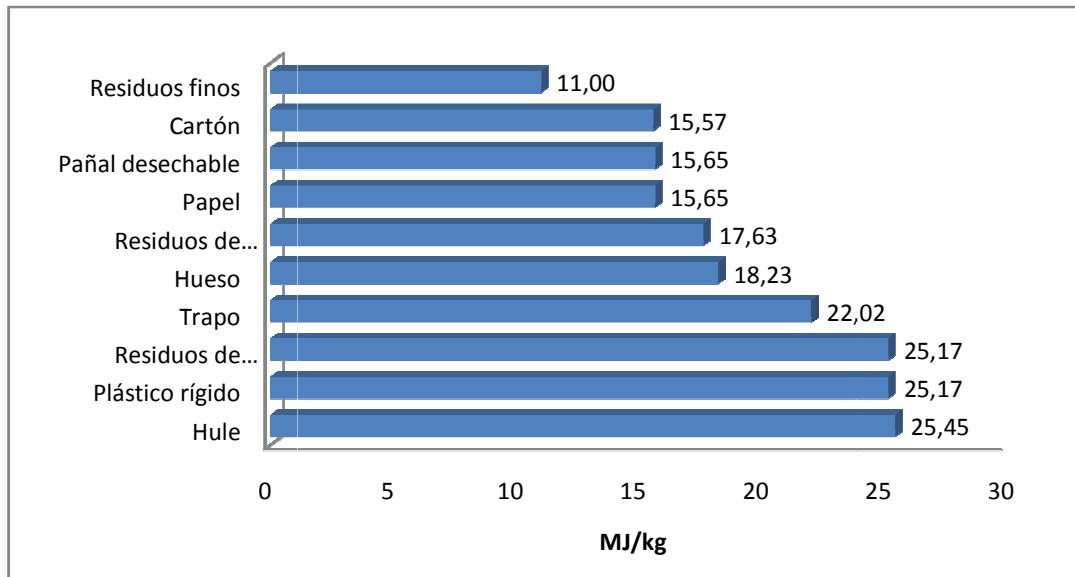
Fuente: Elaboración propia con información de (28) y (29)

^aEl contenido orgánico es de etiquetas, recubrimientos y otros materiales adjuntos.

^bSe tomó en cuenta el análisis elemental de la fibra de algodón reportado en (29) por ser el componente mayoritario de los pañales



Gráfico 13. PCI (base seca) de diferentes residuos generados en el D.F.



Fuente: Elaboración propia.

Con la información de análisis elemental y las fracciones de materiales que componen a los RSU generados en el DF se calcula el aporte energético de una tonelada de residuos, para este cálculo se considera que los metales, el vidrio y la fracción de otros⁵ no brindan ningún aporte energético en la mezcla de RSU.

De acuerdo al cálculo realizado, ver Tabla 8, el contenido energético de una tonelada de RSU sin preselección de componentes corresponde a **8,021,429 kJ**, el cual al ser dividido por el peso en base seca de los residuos en una tonelada (617.9 kg), resulta **12,981 kJ/kg**, que es el poder calorífico inferior de la mezcla de RSU (PCI).

Se ha identificado que el mayor aporte de energía lo brindan los plásticos, el papel y los residuos de alimentos, por lo que en un concepto eficiente de recuperación de energía de RSU conviene tener una mayor proporción de las fracciones con alto poder calorífico y bajo contenido de humedad.

⁵ La fracción considerada como "otros" corresponde a los residuos que no se pudieron clasificar en las categorías mostradas en la Tabla 7 esta fracción es muy heterogénea y de difícil caracterización, por lo cual no se considera como aportador de energía.



Tabla 8. Contenido energético en una tonelada de residuos sin preselección

Componente	Peso (%)	Peso (kg)	Humedad (%)	Materia seca (kg)	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)	Energía (kJ)	Contribución total (%)
Cartón	5.36	53.6	5.0	50.9	15,699.5	15,574.5	793,055	9.9
Residuos finos	1.21	12.1	32.0	8.2	11,802.7	11,002.7	90,530	1.1
Hueso	0.08	0.8	25.0	0.6	18,854.8	18,229.8	10,938	0.1
Hule	0.20	2.0	2.0	2.0	24,219.7	24,169.7	47,373	0.6
*Lata	1.58	15.8	3.0	15.3	0.0	-75.0	-1,149	-0.01
*Material ferroso	1.39	13.9	2.0	13.6	0.0	-50.0	-681	-0.01
*Material no ferroso	0.06	0.6	2.0	0.6	0.0	-50.0	-29	-0.0004
Papel	14.58	145.8	6.0	137.1	15,798.9	15,648.9	2,144,716	26.7
Pañal desechable	3.37	33.7	80.0	6.7	18,508.7	16,508.7	111,269	1.4
Plástico película	6.24	62.4	0.2	62.3	25,171.2	25,166.2	1,567,230	19.5
Plástico rígido	4.33	43.3	0.2	43.2	25,171.2	25,166.2	1,087,517	13.6
Residuos de alimentos	34.66	346.6	70.0	104.0	18,851.4	17,101.4	1,778,208	22.2
Residuos de jardinería	5.12	51.2	60.0	20.5	17,776.8	16,276.8	333,350	4.2
Trapo	0.64	6.4	10.0	5.8	22,271.1	22,021.1	126,842	1.6
*Vidrio de color	4.00	40.0	2.0	39.2	0.0	-50.0	-1,960	-0.02
*Vidrio transparente	6.77	67.7	2.0	66.3	0.0	-50.0	-3,317	-0.04
*Otros	10.41	104.1	60.0	41.6	0.0	-1,500.0	-62,460	-0.8
Total	100	1000	38.21	617.9			8,021,429	100.0

Fuente: Elaboración propia

PCS: Poder Calorífico Superior

PCI: Poder Calorífico Inferior

* Se consideró que estos componentes no aportaban energía, sino que absorben energía por su contenido de agua



Hasta este punto se ha considerado el contenido energético de los residuos sin algún tipo de selección previa; sin embargo, en un escenario de recuperación de una fracción de los materiales tanto reciclables como compostables, se ha realizado la consideración que el 20% de los RSU sean destinados a compostaje, el 20% a reciclaje y el resto para conversión energética mediante tratamiento térmico. Bajo estos criterios se propone un porcentaje de recuperación de diversas componentes de los RSU que se detalla en la Tabla 9.

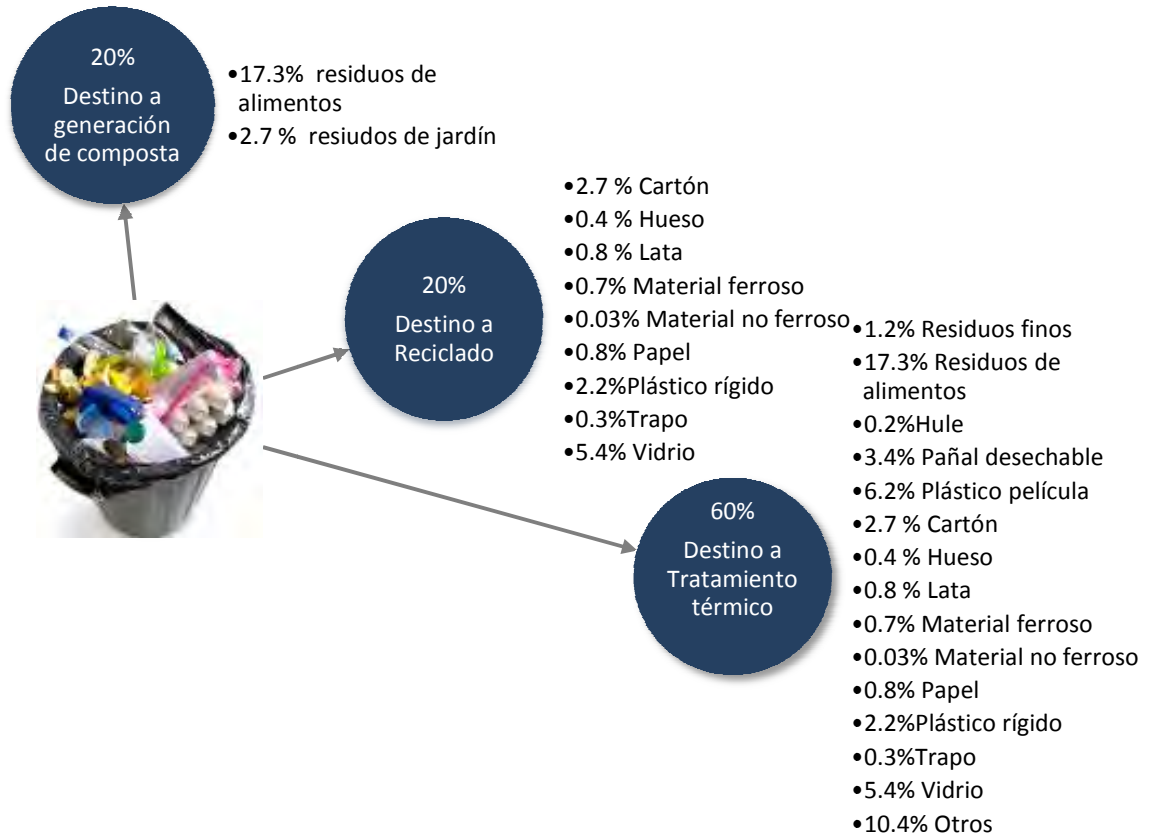
Tabla 9. Fracciones propuestas de recuperación de componentes de los RSU

Componente	Contenido en la muestra	Fracción recuperada	Recuperación (%)	Porcentaje a tratamiento térmico (%)
Cartón	5.4	0.5	2.7	2.7
Residuos finos	1.2	0.0	0.0	1.2
Hueso	0.1	0.5	0.04	0.0
Hule	0.2	0.0	0.00	0.2
Lata	1.6	0.5	0.8	0.8
Material ferroso	1.4	0.5	0.7	0.7
Material no ferroso	0.1	0.5	0.03	0.03
Papel	14.6	0.6	8.0	6.6
Pañal desechable	3.4	0.0	0.0	3.4
Plástico película	6.2	0.0	0.0	6.2
Plástico rígido	4.3	0.5	2.2	2.2
Residuos de alimentos	34.7	0.5	17.3	17.3
Residuos de jardinería	5.1	0.5	2.6	2.6
Trapo	0.6	0.5	0.3	0.3
Vidrio de color	4.0	0.5	2.0	2.0
Vidrio transparente	6.8	0.5	3.4	3.4
Otros	10.4	0.0	0.0	10.4
Total %	100.0		40.0	60.0

Fuente: Elaboración propia



Figura 8. Porcentaje propuesto de la composición de RSU



Fuente: Elaboración propia

Una tonelada de residuos con la composición mostrada en la Figura 8 tiene un contenido energético de **7,969,275 kJ**, lo que corresponde a un PCI de **13,186 kJ/kg** que es una tercera parte del PCI del gas natural(30). Comparando el PCI de los residuos en bruto con el PCI de los RSU con una separación selectiva se observa que la modificación en las fracciones de componentes de los RSU modifica el poder calorífico. La selección de fracciones aumentó en un 1.42% el PCI, es decir el contenido energético por unidad de masa de los RSU, se pueden lograr valores más altos de PCI si se hace una selección más aguda en donde se excluyan principalmente los componentes con alto contenido de humedad y bajo



contenido de carbón, por ejemplo si se excluye toda la fracción de residuos de alimentos, jardinería y los materiales inertes se obtendría un PCI de **19,040 kJ/kg**.

En el contexto de generación de energía eléctrica a partir de los RSU se debe tomar en cuenta la eficiencia de equipos en los cuales se va a llevar a cabo el proceso de conversión. En las plantas de conversión de residuos existen pérdidas inherentes del sistema cercanas al 25 % entre la energía de entrada al sistema y la energía de salida (31); en los equipos de generación eléctrica se pueden obtener eficiencias que van del 25%, si se usa un motor de gas, al 40 % si se utiliza una turbina de gas(32).

Tomando en cuenta el escenario de recolección de 10,879 toneladas diarias de residuos en el Distrito Federal y que se pretende que el 60 % de éstos sean valorizados mediante tratamiento térmico, se obtienen 6,527 ton/día de materia prima disponible para ser convertida en energía.

Asumiendo una eficiencia de 75 % para el sistema de tratamiento térmico y de 35% para el equipo de generación de energía eléctrica se podrían obtener 581 kWh por cada tonelada de residuos, lo que significa 3,792,793 kWh al día que servirían para satisfacer el 66 % del consumo de energía eléctrica de los servicios públicos del Distrito Federal (ver Tabla 10), representando un ahorro de \$ 2,214,991,569 pesos al año⁶.

⁶ Tomando en cuenta un costo de \$1.6 pesos por cada kWh consumido (106)



Tabla 10. Potencial de producción de energía eléctrica a partir de los RSU generados en el D.F.

Descripción	Valor
Energía total contenida en 1 tonelada de RSU	7,969,274.95 kJ (2,213 kWh)
Eficiencia del sistema de tratamiento térmico	75 %
Eficiencia del sistema de generación de energía eléctrica	35%
RSU para tratamiento térmico	6,527 ton/día
Energía eléctrica a partir de 1 tonelada de residuos	581 kWh
Capacidad	158 MW
Consumo de energía eléctrica diario de los servicios públicos del Distrito Federal (promedio del año 2007 y 2008)	5,746,260 kWh
Porcentaje de energía eléctrica para servicios públicos que puede ser suministrada a partir de la conversión térmica de RSU	66
Ahorro por concepto de pago de consumo de energía eléctrica	\$ 2,214,991,569

Fuente: Elaboración propia

2.3 Conclusiones del capítulo

La energía contenida en los residuos del D.F. es principalmente aportada por los componentes que tienen un alto contenido de carbono y que se encuentran en mayor proporción como el papel, el plástico y el cartón, los componentes que menos energía aportan son los que contienen una gran cantidad de humedad como los residuos de jardinería y los orgánicos.

Con base en la información presentada en el capítulo, es evidente que el potencial de los RSU del D.F. como combustibles es alto, y que su tratamiento mediante un proceso térmico es factible, teniendo en cuenta que el poder calorífico de los RSU mínimo requerido para llevar a cabo este tipo de tratamiento, sin necesidad de aporte de un combustible extra, es de 4,200 kJ/kg y el que se obtuvo del análisis teórico de la mezcla de RSU del D.F. es de 12,981 kJ/kg.



El PCI de los RSU de D.F. se verá modificado a partir de la implementación de los programas de separación que el gobierno tiene planeado, con lo que se podrá obtener una fracción con menor contenido orgánico, por lo cual la mezcla de RSU tendrá menor contenido de humedad, esto será conveniente para la aplicación de un tratamiento de tipo térmico ya que aumentaría el poder calorífico de lo RSU y se podrían disminuir costos de operación por concepto de acondicionamiento de RSU, específicamente en el secado.

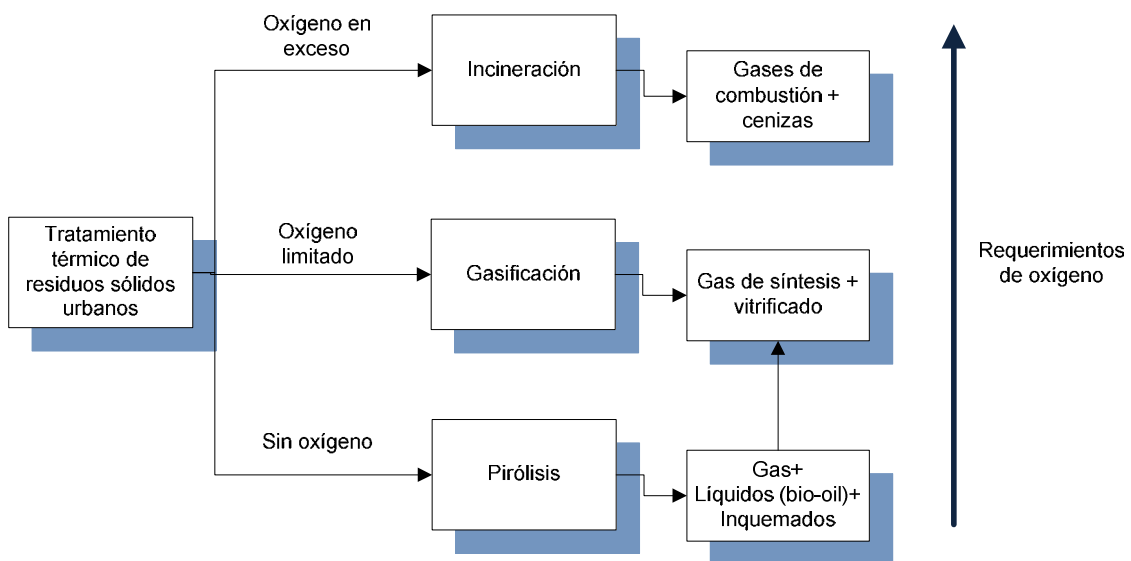
El ahorro por concepto de generación propia de energía eléctrica en la modalidad de autoconsumo, podría ser de hasta el 66% de acuerdo a los cálculos realizados.



3. Fundamentos de las tecnologías de tratamiento térmico

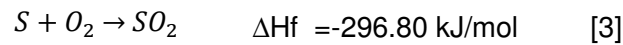
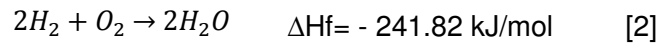
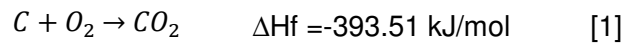
De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo anterior, los RSU del Distrito Federal tienen un gran potencial para ser utilizados como combustibles; los procesos que permiten hacer uso de éstos para tal fin son los de conversión térmica, que por un lado permiten obtener a partir de los RSU productos gaseosos, líquidos y/o sólidos; y además, reducir el volumen de éstos con destino a disposición final. Estos procesos se basan en la transformación de las moléculas orgánicas por la acción del calor, y comprenden tecnologías de tratamiento a altas temperaturas, que se pueden clasificar de acuerdo a las necesidades de oxígeno del proceso en las siguientes: combustión con exceso de aire, también llamada incineración; gasificación y pirólisis.

Figura 9. Clasificación de los tratamientos térmicos de acuerdo con sus requerimientos de oxígeno



Fuente: Elaboración propia

La combustión estequiométrica es aquella que se lleva a cabo con la cantidad de oxígeno exacto que requiere la reacción de combustión; en este tipo de reacciones se producen compuestos oxidados, se emite luz y existe una rápida generación de calor; las reacciones básicas en la combustión de los RSU son las siguientes:



Suponiendo que el aire contiene un 23.15 % de oxígeno en peso, la cantidad de aire necesaria para que se lleve a cabo la combustión estequiométrica de 1 kg de carbono es de 11.52 kg; para 1 kg de hidrógeno se requieren 34.56 kg de aire; y para la combustión estequiométrica del azufre se requieren 4.31 kg de aire (28). Llevar a cabo una conversión térmica de los RSU mediante una combustión estequiométrica es casi imposible, es por esto que para garantizar que se lleven a cabo las reacciones de oxidación necesarias para convertir todo el carbón y el hidrógeno contenido en los residuos a CO_2 y H_2O se utiliza oxígeno adicional al estequiométricamente requerido.



3.1 Combustión con exceso de aire (Incineración)

La combustión con exceso de aire, también conocida como incineración, es un proceso que actualmente se utiliza para la eliminación de residuos sólidos que no pueden ser reciclados, reutilizados o dispuestos por otra tecnología, éste proceso permite una reducción de volumen del 90% y una reducción de masa de cerca del 70%. La energía química contenida en los componentes orgánicos de los residuos es convertida en energía calorífica (33).

En el proceso de incineración, es de suma importancia tener un control sobre el porcentaje de exceso de aire, ya que al proporcionar una cantidad adecuada se facilita la combinación de las moléculas del aire con el combustible (en este caso los RSU), incrementando la eficiencia de la combustión y disminuyendo la formación de monóxido de carbono. El exceso de aire influye en la temperatura y la cantidad de productos de la combustión, a mayor cantidad de oxígeno menor temperatura de flama y mayor contenido de oxígeno en los gases de combustión. En un proceso de combustión, las temperaturas de los gases van de los 800 a los 1,200 °C

Tabla 11. Exceso de aire requerido para llevar a cabo una combustión eficiente de diferentes combustibles

Combustibles	Exceso de aire (%)
Gas natural	5-12
Gas LP	15
Combustóleo	20-25
Carbón pulverizado	25-30
RSU	50-200

Fuente: Elaboración propia a partir de (34)

Como se observa, el porcentaje de exceso de aire para la incineración de los residuos es muy elevado comparado con la de otros combustibles. En un proceso de incineración los residuos con o sin tratamiento son alimentados al horno de combustión donde se agrega una cantidad de aire adicional al



estequiométricamente requerido con el cual se asegura la combustión completa de los residuos alimentados (ver Tabla 11).

Las instalaciones en las que se lleva a cabo el proceso de incineración son de dos tipos, las conocidas como “Mass Burn” en donde el único pretratamiento que se le da a los residuos es el de retirar los objetos de gran tamaño y los residuos peligrosos y explosivos; en este tipo de instalaciones la cámara en donde se lleva a cabo la combustión es comúnmente un horno de parrillas (35). El otro tipo de incineradora es en la que se lleva a cabo un pretratamiento de los residuos que incluye una clasificación, secado e incluso una peletización de los mismos, este tipo de incineradoras utilizan la tecnología de hornos de lecho fluidizado.

En las instalaciones de incineración modernas se cuenta con sistemas de aprovechamiento energético en donde la energía contenida en los residuos es recuperada como calor. Dichos sistemas incrementarán el tiempo de construcción de las instalaciones, y de forma muy considerable la inversión inicial; además de que crean un importante conjunto de necesidades a la hora de su correcto funcionamiento y mantenimiento.

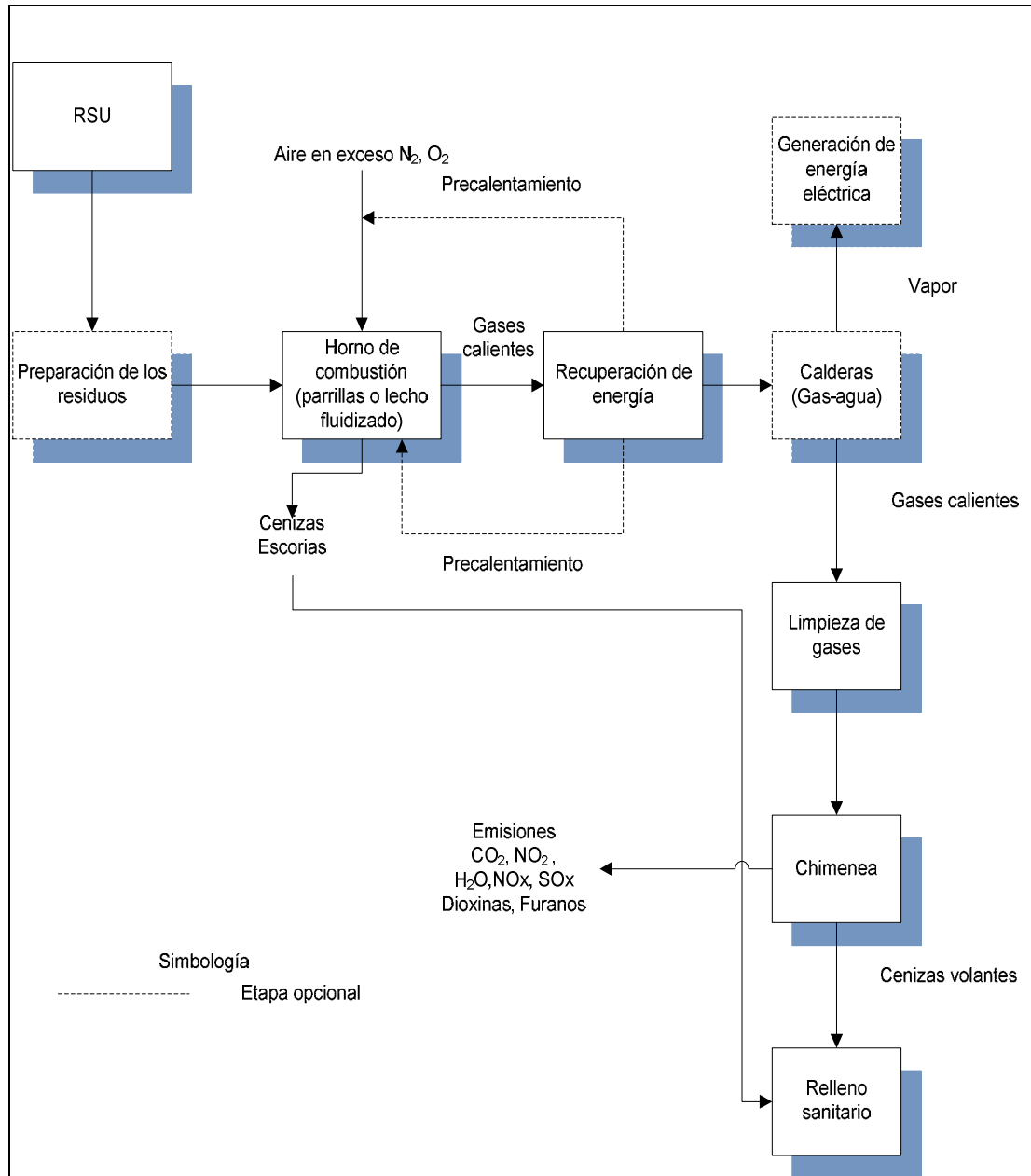
Algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta para la aplicación de la incineración son(36):

- Asegurar que el PCI promedio anual de los residuos no sea menor de 7 MJ/kg
- La tecnología a utilizar debe estar ampliamente probada y tener plantas de referencia en exitosa operación.
- El horno debe ser diseñado para una operación estable y continua.
- La cantidad mínima anual de residuos para incinerar no debe ser menor de 50,000 toneladas, y las variaciones de carga a la semana no deben de superar el 20%

El proceso de incineración se muestra en la Figura 10



Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de incineración



Fuente: Modificado de (37)



3.1.1 Tipos de hornos

i. Hornos de parrillas

Los hornos de parrillas son los más extendidos para el tratamiento térmico mediante incineración de los RSU. Existen diversos tipos de parrillas como los que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Tipos de parrillas que utilizan los hornos de incineración.

Tipo de Parrilla	Descripción
Parrilla transportadora	Consiste en una reja de movimiento continuo de alimentación y una o más rejillas de quemado. La reja de alimentación está ubicada directamente debajo de la tolva de carga desde la cual caen los desechos sobre la parrilla. Los desechos se secan parcialmente mientras están sobre la reja de alimentación
Parrilla reciprocante	Los desechos se mueven a través de la hornilla desde la tolva, mientras la parrilla es estacionaria, excepto por movimientos alternos reciprocantes de las barras de la parrilla. La acción de las barras mueven los desechos hasta la siguiente barra. La tasa de quemado se ajusta mediante el control de la velocidad de las barras.
Parrilla oscilante	La operación es similar a la parrilla reciprocante, pero los desechos se mueven a través de la hornilla por la acción oscilante de las parrillas.
Parrilla de rodillos	Es un diseño relativamente nuevo los desechos son quemados a medida que se mueven mediante una serie de barras giratorias.

Fuente: Modificado de (38)

En un proceso de “mass burn” los residuos son introducidos a la parrilla por gravedad o por medio de un cilindro hidráulico a una primera zona que es la parrilla de pre secado en la que la temperaturas oscila entre los 100 y 250 °C debido al aire de combustión. Conforme la temperatura se incrementa ocurren



los siguientes procesos: de 250-600°C comienza la combustión de los destilados volátiles por efecto de la radiación. De la combustión se desprenden diferentes tipos de gases procedentes de la descomposición térmica y carbonización de los residuos. De 600-800°C se realiza una combustión generalizada de toda la masa del combustible y descomposición térmica de todos los carbonatos y craqueo de gases producidos con posterior combustión.

El horno o cámara de combustión no proporciona el tiempo ni la temperatura suficiente para destruir los componentes orgánicos de los residuos por lo que en las incineradoras es común encontrar una cámara de postcombustión en la cual se añade aire y en la mayoría de los casos un combustible auxiliar como fuente de calor suplementaria en la que los gases de combustión permanecen un tiempo de residencia mínimo de 2 segundos que garantiza su completa oxidación, en esta cámara se pueden alcanzar temperaturas que van de los 800°C a los 1200°C (39).

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, la temperatura mínima que se debe lograr en esta última etapa es de por lo menos 850°C, alcanzados en o cerca de la pared interna de la cámara y en caso de que se incineren residuos que contengan más del 1% de sustancias organocloradas la temperatura deberá de elevarse hasta 1,100°C y los gases deberán permanecer 2 segundos como mínimo. Este tipo de hornos tiene ventajas y desventajas que se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13. Ventajas y desventajas del sistema de incineración con horno de parrillas.

Ventajas	Desventajas
Admiten todo tipo de carga.	Las parrillas propician la aparición de restos carbonosos en las escorias.
Inversión relativamente baja.	Las parrillas sobre todo las móviles necesitan un frecuente mantenimiento por fallas
No es necesario un pretratamiento de los	



Ventajas	Desventajas
<p>residuos.</p> <p>La tecnología ha sido ampliamente probada.</p> <p>Permite una eficiencia térmica hasta del 85%</p> <p>Cada horno puede ser construido con una capacidad mayor a 1,200 ton/d</p>	<p>mecánicas.</p> <p>El contenido variable de los residuos provocará una variación en las condiciones de operación.</p> <p>Requiere un exceso de aire normalmente del 100%</p> <p>La velocidad del aire es tan alta que provoca arrastre de materia.</p> <p>Las parrillas metálicas son el punto débil del sistema, ya que tienen limitada la carga térmica. La temperatura que puede soportar la parrilla es mucho menor de la que puede soportar un material refractario, de ahí la necesidad de la refrigeración con aire. (25)</p>

Fuente: Elaboración propia a partir de información de (36) y (39)

ii. Hornos de lecho fluidizado

La fluidificación es una operación en la que un sólido se pone en contacto con un gas o un líquido, adquiriendo ciertas características similares a la de los fluidos. Un lecho fluidizado consiste fundamentalmente en un fluido que atraviesa en dirección ascendente un lecho de partículas sólidas soportadas por un distribuidor. El objetivo principal es alcanzar coeficientes de transferencia de calor elevados y un alto grado de uniformidad de temperatura(39).

Un sistema sencillo de lecho fluidizado consiste en un cilindro vertical de acero, normalmente forrado con material refractario, un lecho de arena o caliza, una



placa de rejilla de apoyo y toberas de inyección de aire. La acción hirviente del lecho fluidizado provoca turbulencias y favorece la mezcla, transfiriendo calor al combustible. Cuando se pone en funcionamiento se utiliza combustible auxiliar para aumentar la temperatura (de entre 790 a 950 °C). Después del arranque no hace falta utilizar un combustible auxiliar ya que puede permanecer con temperaturas elevadas hasta por 24 horas(28)

Tabla 14. Ventajas y desventajas del sistema de incineración con horno de lecho fluidizado

Ventajas	Desventajas
<p>Permiten la utilización de combustibles de bajo PCI, con elevados contenidos en cenizas y altas concentraciones de dióxido de azufre.</p> <p>Temperaturas en el lecho cercanas a los 1200 °C muy superiores a los obtenidos en los hornos de parillas.</p> <p>Posibilidad de neutralizar el azufre contenido en el carbón con dolomita o piedra caliza. Cuando se utiliza caliza ésta reacciona con el SO₂ y el oxígeno de los residuos emitiendo dióxido de carbono (CO₂) y formando sulfato de calcio (CaSO₄) que se puede separar con la cenizas (39) disminuyendo considerablemente los costos de equipos de limpieza de gas.</p> <p>De dimensiones menores comparados con los sistemas de hornos de parrillas.</p> <p>Se pueden alcanzar eficiencias térmicas de hasta el 90%</p>	<p>Mayor inversión con respecto a un horno de parrillas, ya que este tipo de hornos sólo admite una carga con características especiales, que implica el uso de equipos para el pretratamiento.</p> <p>Es necesario mantener una composición de residuos homogénea.</p> <p>La tecnología ha sido bien probada para incineración de lodos de plantas de tratamiento de agua, pero sólo hace unos pocos años se empezaron a utilizar para incinerar RSU.</p>

Fuente: Elaboración propia a partir de información de (36) y (39) Productos obtenidos y recuperación de energía



Un beneficio adicional a la reducción de volumen y masa que se puede obtener a partir de la incineración de los residuos sólidos urbanos es la recuperación de la energía contenida en los mismos.

Existen dos tipos generales de sistemas de recuperación de energía en forma de calor:

- Gas-agua: Para producción de vapor, es el más común de los sistemas de recuperación. Este vapor a su vez, puede ser destinado a consumos internos y externos de la instalación o para generación de energía eléctrica. Por razones económicas, pueden ir destinados a sustituir calderas alimentadas con combustibles convencionales, lo cual implica la necesidad de producir cantidades de energía de una manera constante y consistente con las necesidades del proceso.
- Gas-aire: se usan comúnmente para satisfacer necesidades del propio proceso de incineración. Un precalentamiento del aire de combustión o de los residuos a incinerar, reduce apreciablemente el tiempo necesario para alcanzar su temperatura de oxidación, aumentando de esta manera el tiempo efectivo de residencia en la cámara de combustión. Este precalentamiento reduce la cantidad de combustible auxiliar necesario para mantener una mínima temperatura, concepto que suele constituir la partida con el coste más importante en incineradores.

La eficiencia térmica del sistema de recuperación de energía en una planta de incineración de RSU depende del uso final de la energía recuperada. Si se desea utilizar la energía para la generación de energía eléctrica la eficiencia será baja pero el costo por ésta será alto, en cambio si se utiliza para generar vapor, la eficiencia térmica será alta pero esta energía es considerada como económica, y los costos de las instalaciones técnicas necesarias son bajos. La Tabla 15 resume la eficiencia de la recuperación de energía para cada uso de ésta con respecto a la energía de entrada contenida en los residuos.



Tabla 15. Resumen de eficiencias en diferentes sistemas de recuperación de energía

Uso de la energía	Recuperación		Eficiencia total
Sólo calor	Calor	80%	80%
Sólo vapor	Vapor	80%	80%
Sólo energía eléctrica	Energía eléctrica	25%	25%
Para vapor y energía eléctrica	Vapor	0-75%	25-75%
	Energía eléctrica	0-25%	
Para calor y energía eléctrica	Calor	60-65%	85%
	Energía eléctrica	20-25%	

Fuente: Modificado de (36)



3.1.2 Residuos del proceso

La combustión de los RSU produce grandes cantidades de gases de combustión, estos gases contienen residuos de la combustión incompleta y una amplia gama de contaminantes nocivos para la salud, de los materiales incombustibles se obtienen escorias que son removidas del horno. Los contaminantes y su concentración dependen de la composición de los residuos que son incinerados y las condiciones de combustión. Sin embargo estos gases siempre contienen cenizas, metales pesados y una variedad de componentes orgánicos e inorgánicos (36).

A continuación se describen los diferentes residuos y contaminantes que se generan en la combustión de los RSU.

Dioxinas y Furanos

Las dibenzo-para-dioxinas y dibenzofuranos (PCDD y PCDF) son compuestos con propiedades químicas similares. Todas las dioxinas y furanos son sólidos orgánicos, con altos puntos de fusión y baja presión de vapor. Se caracterizan por tener una solubilidad en agua extremadamente baja y por adsorberse fuertemente en las superficies. Las dioxinas, furanos y el hexaclorobenceno (HCB) se forman en la mayoría de los sistemas de combustión. Entre éstos se encuentra la incineración de residuos (residuos sólidos municipales, lodos de planta de tratamiento, residuos médicos y residuos peligrosos); la combustión de diversos combustibles, como carbón, madera y los productos derivados del petróleo; los hornos cementeros y la quema no controlada de basura doméstica en patios (40).

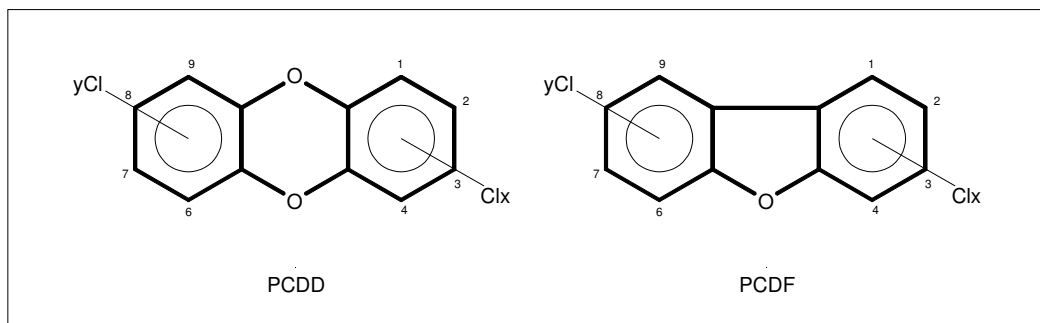
Las dioxinas y furanos son térmicamente estables hasta aproximadamente los 600 °C, un nivel térmico que asegure una temperatura de 800°C y un tiempo de residencia de 2 segundos para los gases de combustión garantiza la destrucción de estos compuestos, pero debido a que el horno de combustión tiene diferentes



zonas de temperaturas, es posible que en esas zonas se lleve a cabo la formación de dioxinas y furanos.

A continuación se presenta la estructura de las dioxinas y furanos.

Figura 11. Estructura básica de las dibenzoparadioxinas (PCDD) y los dibenzofuranos (PCDF)



Otra fuente de generación de estas sustancias es la llamada *síntesis de novo*, que se lleva a cabo durante el enfriamiento de los gases, a temperaturas entre 250 y 500 °C en donde las dioxinas se reforman, por ello se recomienda acelerar la velocidad de enfriamiento de los gases de combustión.

El incremento de exceso de aire en el proceso de combustión en un horno de parrillas también es un factor de generación de dioxinas y furanos que favorece su incremento debido al enfriamiento provocado por la corriente de aire(39).

Contaminantes gaseosos

Entre los contaminantes gaseosos más abundantes en los gases de combustión se encuentran:

El HCl que se genera por la combustión del PVC, el SO₂ por la combustión de los componentes azufrados de los RSU, el HF por la combustión de compuestos fluorados y el NO_x por parte del nitrógeno en los residuos



(principalmente de tipo orgánicos) y el contenido de nitrógeno en el aire que se utiliza para la combustión (36).

Cenizas de calderas y volantes

Las partículas finas de la incineración de los residuos son llevadas con el gas de combustión fuera del horno y al interior de las calderas, en donde algunas partículas se depositan y son recuperadas mediante tolvas (36).

Cuando el gas combustible es enfriado en la caldera, algunos componentes gaseosos (HCl, metales pesados evaporados $ZnCl_2$, $PbCl_2$ y $CdCl_2$) condensan en las partículas formando cenizas volantes. Estas cenizas representan del 2 al 3% del peso de los residuos. Su destino final es comúnmente el relleno sanitario (36).

Lodos

Cuando se remueven HCl y SO_2 del gas de combustión se utilizan métodos de lavado en las que se consume agua, con lo que se producen una o dos corrientes de agua residual. Del tratamiento de agua ácida resulta la formación de TMT⁷, obteniendo 1 kg de substancia seca por tonelada de residuos incinerado. La remoción del SO_2 normalmente forma lodos de yeso, obteniéndose aproximadamente 3 kg de materia seca por cada tonelada (36).

En la Tabla 16. se resumen las entradas y salidas del proceso de combustión con aire en exceso.

⁷ TMT : Trimetilestaño (compuesto neurotóxico)



Tabla 16. Entradas y salidas del proceso de combustión con aire en exceso

Entrada al proceso de combustión		Salidas del proceso de combustión		
Residuo	Aire	Gases emitidos a la atmósfera	Contaminantes capturados	Calor
C	79% N ₂ 21% O ₂ Vapor de agua 0,0318% de CO ₂ en aire limpio y seco	CO ₂	HCl HF Br ₂ I ₂ P ₂ O ₅ SO ₂ NO _x Metales, óxidos e hidróxidos metálicos	Aire caliente
H				
O				
Cl				
F				
Br				
I				
S				
P				
Metales				

Fuente: Modificado de (41)

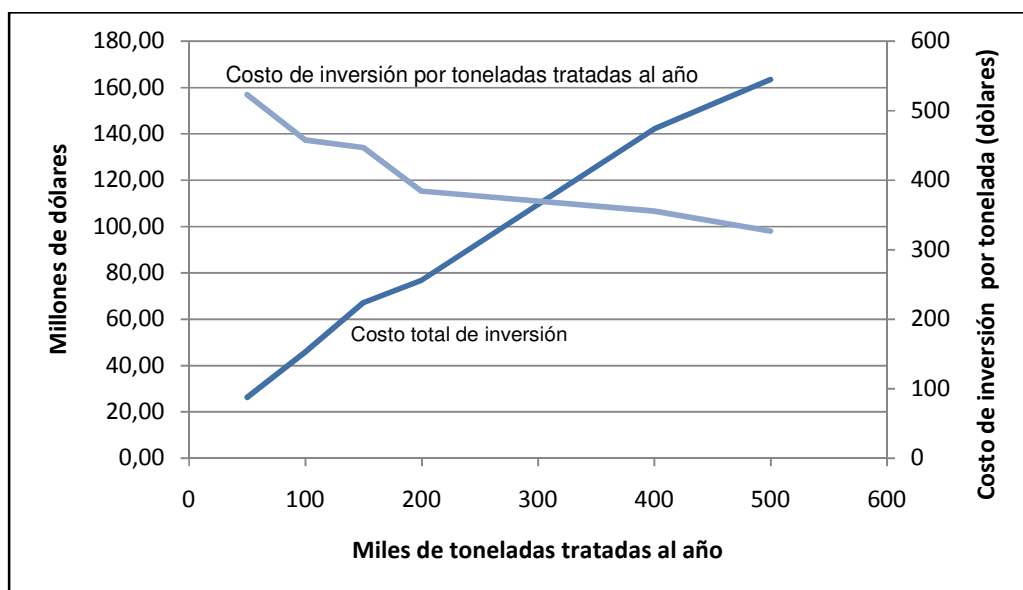


3.1.3 Costos

El costo de incineración de los RSU comparado con el costo de disposición en rellenos sanitarios es mayor debido a los altos costos de inversión, mantenimiento y operación. Dependiendo de los costos actuales (que son sensibles al tamaño de la planta) y a los ingresos por la venta de energía, el costo neto por tonelada de residuos tratada se encuentra normalmente en el intervalo de los \$25 a los \$100 dólares (en 1998) con un costo promedio de \$50 dólares, mientras que la disposición convencional de los RSU tiene un costo que va de los \$10 a los \$40 dólares(36).

La inversión actual para las plantas de incineración depende principalmente de la capacidad de la planta (toneladas por día tratadas y su correspondiente poder calorífico). El concepto de economía de escala se aplica a este tipo de plantas, ya que aquellas de mayor capacidad tienen costos menores por tonelada instalada que las de baja capacidad (ver Gráfico 14)

Gráfico 14. Costos de inversión para plantas de incineración de RSU en el Reino Unido



Fuente: Elaboración propia a partir de información de (37)



Los costos de inversión se ven influenciados también por la maquinaria utilizada para la producción de energía que puede ser desde un simple enfriado de los gases de combustión (sin producción de energía) hasta la producción combinada de calor y energía. Las ventas de energía son un elemento significativo en la economía de la incineración de residuos. En algunos casos los ingresos por la energía vendida pueden ser tan altos que pueden cubrir del 80 al 90 % de los costos totales, pero en promedio los ingresos por venta de energía cubren el 40 % de los costos totales.

También se incrementarán los costos dependiendo del equipo de limpieza de gases con que se cuente, que a su vez se ve influenciado por la reglamentación existente, el costo total de inversión puede ser reducido aproximadamente un 10 % si la planta es equipada con un equipo básico de control de emisiones. Sin embargo, si la planta tiene un sistema avanzado de limpieza los costos aumentan hasta en un 15 %, en México se debe dar cumplimiento con la NOM-098-SEMARNAT-2002, en la que se dan las especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes para la incineración de residuos.

En cuanto a los costos fijos de operación, se estima que para las incineradoras en Asia estos costos representan el 2 % de la inversión total y los costos de mantenimiento son estimados en un 3.5 % de la inversión total.

3.2 Gasificación convencional

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 CO_2 , CO , H_2 , CH_4 y H_2O . 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 entre 4 a 6 MJ/Nm³. La gasificación con oxígeno resulta en una mejor calidad del gas, obteniéndose un poder calorífico que va de los 10 a los 18 MJ/Nm³

Alrededor del mundo existen más de 200 instalaciones de gasificación que utilizan como materia prima principalmente carbón, coque, petróleo y gas, y en menor medida la biomasa (incluyendo a los residuos sólidos urbanos), para generar productos químicos como amoníaco y metanol, combustibles gaseosos y energía eléctrica.

En el proceso de gasificación la energía contenida en los residuos es transferida a la fase gas como energía química, la cual puede ser usada para producir directamente electricidad por medio de motores o turbinas de gas, obteniendo una mejor eficiencia térmica comparada con el ciclo de vapor que se utiliza en el proceso de recuperación de energía mediante incineración, otra utilidad del gas de síntesis obtenido es que puede ser convertido en químicos mediante las reacciones de Fischer – Tropsch.

Las reacciones que ocurren durante el proceso de gasificación son más de mil, a continuación se resumen las principales:

Reacciones sólido – gas

$C + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow CO$	Combustión parcial	Exotérmica	[4]
$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$	Combustión	Exotérmica	[5]
$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	Hidrogasificación	Exotérmica	[6]
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	Agua -gas	Endotérmica	[7]
$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	Boudouard	Endotérmica	[8]



Reacciones gas-gas

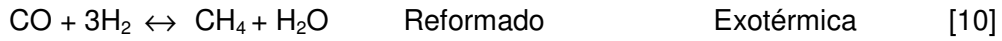
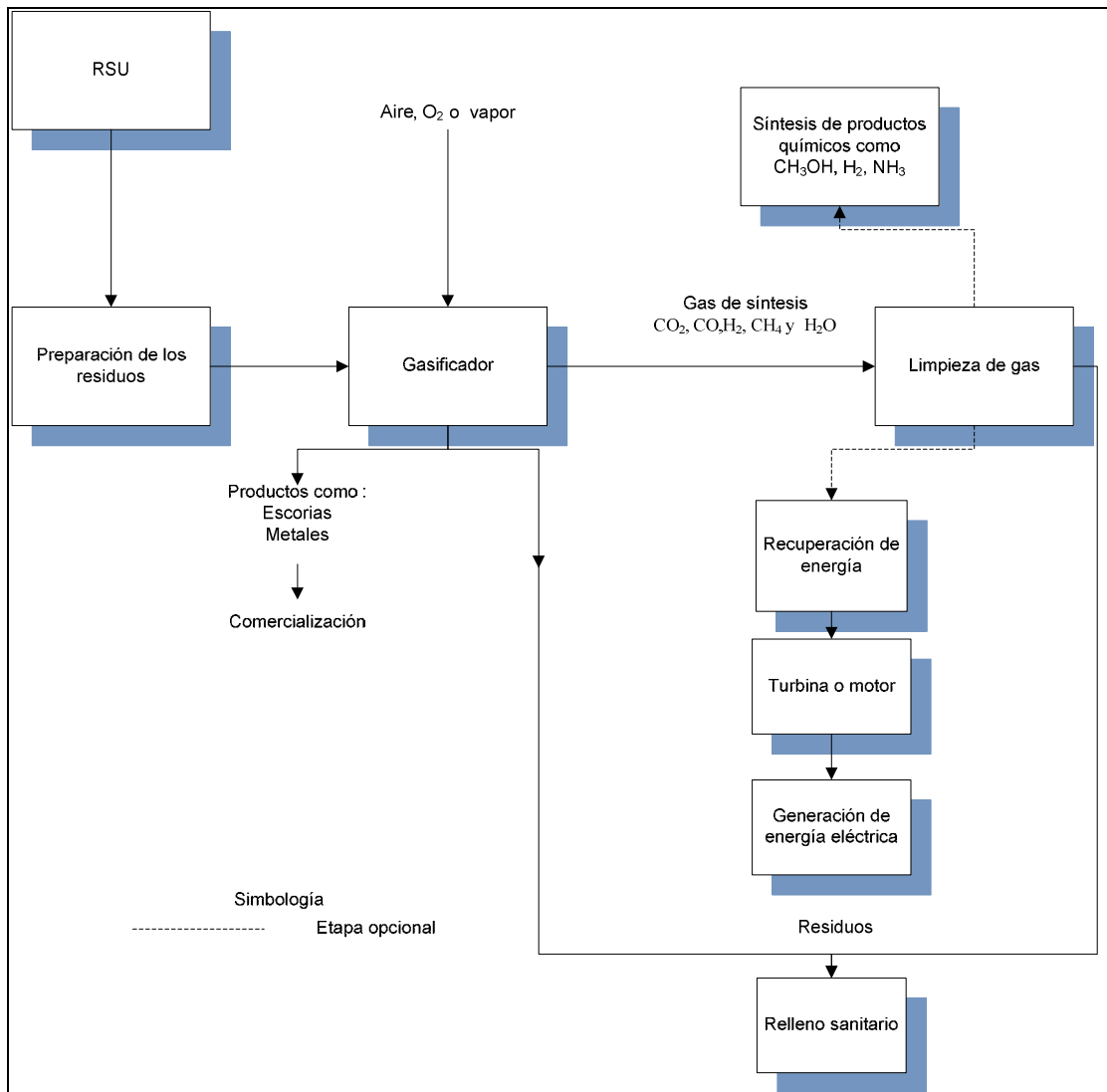


Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de gasificación



Fuente: Elaboración propia



3.2.1 Tipos de gasificadores

De acuerdo con la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) los gasificadores se pueden clasificar según el régimen de flujo en el interior del reactor: gasificador de lecho fijo, lecho fluidizado y flujo por arrastre; en la tabla siguiente se resumen sus principales características

Tabla 17. Características de los diferentes gasificadores

Tipo de reactor	Descripción	Modo de contacto
Lecho fijo		
La razón por la que se les denomina de lecho fijo es porque se presenta una zona de reacción fija, hacia la cual, tanto combustible como oxidante son conducidos (42) . Existen diferentes arreglos en este tipo de gasificadores dependiendo de la dirección de los flujos de alimentación y del agente oxidante (aire, oxígeno o vapor de agua), siendo estos el gasificador de flujo a contracorriente (Updraft), el gasificador en equicorriente (Downdraft) y el gasificador en flujo cruzado. Estos gasificadores trabajan a temperaturas bajas, entre 400 a 1,000 °C y con tiempo de residencia muy largo.		
Downdraft (Flujo concurrente)	En este tipo de gasificador el combustible sólido y el agente oxidante son alimentados por la parte superior del reactor. Ventajas : Baja producción de alquitranes, Tiempo de residencia alto Construcción simple Desventajas: Necesita una alimentación homogénea Formación de slag en la rejilla	Los sólidos y el gas se mueven en dirección descendente



Tipo de reactor	Descripción	Modo de contacto
<p>Updraft (Flujo ascendente)</p>	<p>En este tipo de reactores, los sólidos se mueven lentamente hacia abajo en un recipiente vertical y entran en contacto a contracorriente, con el flujo de agente oxidante, que se mueve hacia arriba, este gasificador tiene la ventaja de secar el combustible mediante el gas ascendente.</p> <p>Ventajas: Eficiencia térmica alta Acepta un alto contenido de humedad en los residuos (hasta 50%) Es fácilmente escalable</p> <p>Desventajas: Baja generación de H₂ Alto contenido de alquitranes en el gas de síntesis</p>	<p>El sólido se mueve hacia abajo, el gas se mueve en dirección ascendente</p>
<p>Corriente cruzada</p>	<p>Los gasificadores de flujo cruzado o tiro transversal son una adaptación de los gasificadores de lecho móvil para el empleo de carbón vegetal. La gasificación de carbón vegetal produce temperaturas muy elevadas (superiores a 1500 °C) en la zona de oxidación que pueden producir problemas en los materiales. En este tipo de gasificadores el propio combustible sirve de aislamiento contra estas altas temperaturas.</p>	<p>El sólido se mueve en dirección descendente el gas perpendicularmente</p>
<p style="text-align: center;">Lecho Fluidizado</p> <p>Este tipo de gasificadores se clasifican según la distribución del lecho, en 2 variantes, el lecho fluidizado circulante y lecho fluidizado burbujeante. Estos gasificadores 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.</p>		



Tipo de reactor	Descripción	Modo de contacto
Lecho burbujeante	El gasificador de lecho fluidizado burbujeante, consiste en un reactor cilíndrico o rectangular, el cual en su interior, cuenta con una rejilla en la parte inferior, por donde se alimenta el agente oxidante, aire y vapor. En este proceso, la velocidad del gas debe ser suficientemente alta, de modo que las partículas sólidas del material alimentado queden suspendidas, expandiéndose por todo el reactor. El aire, debido a su velocidad, ocasiona movimientos circulares, y se distribuye en el lecho como si fueran burbujas en un líquido. Las burbujas de aire generan un lecho fluidizante, que permite una distribución más homogénea del material de combustión y de la temperatura, el diseño de este gasificador permite mantener un mejor contacto entre el gas y los sólidos, facilitando el secado y la reducción de tamaño del material, en comparación con el gasificador de lecho fluidizado circulante(43)	Velocidad del gas relativamente baja, los sólidos inertes permanecen en el reactor
Lecho circulante	Este proceso consta de una cámara donde se hace circular una corriente turbulenta de aire, que es alimentado en 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 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	Los sólidos son removidos , separados y recirculados
Lecho arrastrado		
	El sólido finamente pulverizado es introducido al reactor donde una corriente gaseosa lo arrastra, produciéndose la gasificación de modo casi instantáneo. El tiempo de residencia es muy corto y la gasificación se lleva a cabo a altas temperaturas y presiones.	Las reacciones de gasificación se llevan a cabo en suspensión en un flujo de gas arrastrado



3.2.2 *Productos obtenidos y recuperación de energía*

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

Los diferentes sistemas con los que se puede generar energía eléctrica a partir del gas de síntesis son:

Generación de energía eléctrica a partir de ciclo de vapor

El ciclo de vapor es la opción más sencilla para la recuperación de la energía, en el cual el gas es quemado sin necesidad de un pre tratamiento. La máxima eficiencia eléctrica en una planta de gasificación-ciclo de vapor es del 23 %, que se compara con la eficiencia de un incinerador.

Generación eléctrica a partir de motores de gas

Consiste en la combustión del gas obtenido en motores alternativos modificados, la eficiencia de conversión a energía eléctrica que se puede alcanzar con este tipo de sistemas es del 25 %.

Generación eléctrica con ciclo combinado

En el proceso con ciclo combinado se genera electricidad en dos etapas. En la primera una turbina de gas conectada a un alternador genera energía eléctrica a partir del gas, mientras que en la segunda se aprovechan los gases de escape. Para poder utilizar el gas de síntesis como alimentación a la turbina, es necesario que este pase por tratamiento previo para el control de los compuestos corrosivos como los alquitranes, el gas ácido y los metales alcalinos. La eficiencia de conversión a energía eléctrica es cercana al 30%. (32)



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.

3.2.3 Residuos del proceso

Los principales residuos del proceso son las cenizas y residuos carbonosos (*char*). Aproximadamente se obtienen de un 2 a un 9 % de cenizas del reactor y de un 5 a un 10 % de partículas de los equipos de limpieza.

Los residuos obtenidos directamente del gasificador son inertes y en algunas ocasiones se les utiliza como materia prima para la producción de cerámica estructural. En cambio los residuos obtenidos de la limpieza de los gases son típicamente confinados, ya que contienen una alta concentración de metales pesados(25).

3.2.4 Costos

Los costos del sistema de gasificación dependen de diversos factores entre los que se encuentran el poder calorífico de los residuos, eficiencia de generación eléctrica, la eficiencia de enfriamiento del gas, costos de disposición de residuos, capacidad de la planta, etc., uno de los factores más críticos es el sistema de recuperación de energía al que se encuentre acoplado el sistema de gasificación. Un estudio que muestra la variación de los costos debido a estos factores es el realizado por Libban Yassin *et al.* (2008), de acuerdo con este autor, los costos de inversión de los sistemas de gasificación se encuentran en un intervalo que va de los 40 a los 67 millones de dólares, para capacidades que van de 50,000 a 100,000 toneladas/, año (ver Gráfico 15). El sistema de



gasificación de lecho fluidizado acoplado a un ciclo combinado tiene un costo mayor al acoplado a un motor de gas, como se muestra en la Tabla 18.

Gráfico 15. Costos de inversión para plantas de gasificación

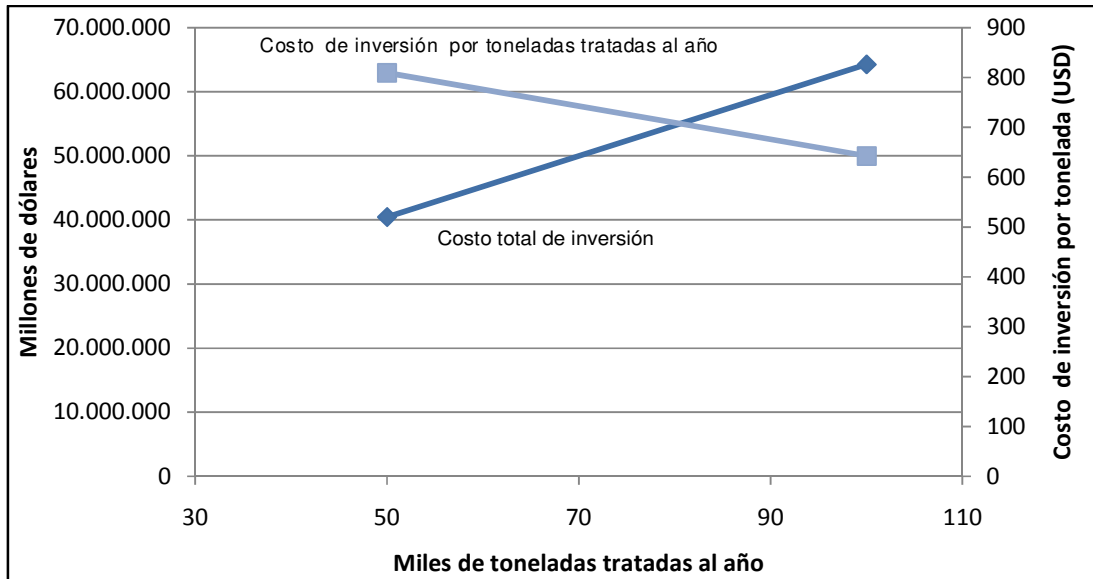




Tabla 18. Aspectos económicos de las opciones de tratamiento de gasificación

Opción de tratamiento	Capacidad (ton/año)	Costos		
		Costos de inversión (USD)	Costos de operación y mantenimiento anuales (USD)	Costos de operación y mantenimiento por tonelada tratada (USD/ton)
Gasificación de lecho fluidizado + motor de gas	50,000	39,116,000	6,007,100	122
Gasificación de lecho fluidizado + Ciclo combinado con turbina de gas		40,233,600	5,867,400	117
Gasificación de lecho fluidizado + turbina de vapor		42,049,700	5,727,700	115
Gasificación de lecho fluidizado + motor de gas	100,000	62,725,300	10,896,600	109
Gasificación de lecho fluidizado +		62,865,000	10,477,500	105
Ciclo combinado con turbina de gas				
Gasificación de lecho fluidizado + turbina de vapor		67,195,700	9,080,500	91

Fuente: Elaborado a partir de (44)

3.3 Gasificación por arco de plasma

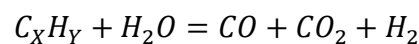
El tratamiento de los residuos sólidos mediante tecnologías de conversión térmica ha tenido un gran auge en las últimas décadas, siendo la tecnología de gasificación por plasma el proceso que menos efectos adversos tiene sobre el medio ambiente. Esta tecnología es un proceso térmico que utiliza temperaturas



extremadamente altas (5,000 a 10,000 °C) y una atmósfera rica en agente ionizante para descomponer completamente los residuos sólidos en partículas muy simples (45). Es decir, su objetivo es convertir el carbón y el hidrógeno contenido en los residuos en gas combustible compuesto de CO e H₂.

Reacciones Típicas

Las principales reacciones que se presentan durante el proceso de gasificación por antorcha de plasma, involucran fundamentalmente a los elementos carbono, hidrógeno y oxígeno. Como se menciona en la Patente US 6,987,792 B2, la principal reacción en el reactor de gasificación por antorcha de plasma puede describirse, de manera general, como sigue:



Donde C_xH_y representa un hidrocarburo arbitrario y el componente H₂O indica el vapor recirculado. El comportamiento termodinámico de esta reacción química indica que es una reacción endotérmica, es decir, requiere de cierta cantidad de energía inicial para que pueda llevarse a cabo. Ahora bien, las reacciones exotérmicas liberan energía cuando se producen, lo que promueve la formación consecutiva y/o paralela de las reacciones endotérmicas que demandan energía del medio para efectuarse. En la Tabla 19 se condensan las reacciones principales que se producen durante el tratamiento de los residuos sólidos (combustible) por antorcha de plasma mediante el proceso pirolisis-gasificación-vitrificación.

Tabla 19. Reacciones químicas típicas del proceso de gasificación por antorcha de plasma

Reacciones Químicas	Tipo de reacción
$C_xH_y + H_2O = CO + CO_2 + H_2$	Endotérmica
$C_xH_y + O_2 = 2CO + H_2$	Exotérmica
$2C + O_2 = 2CO$	Exotérmica
$C + H_2O = CO + H_2$	Endotérmica
$CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2$	Exotérmica

Fuente: Elaboración propia a partir de (46)



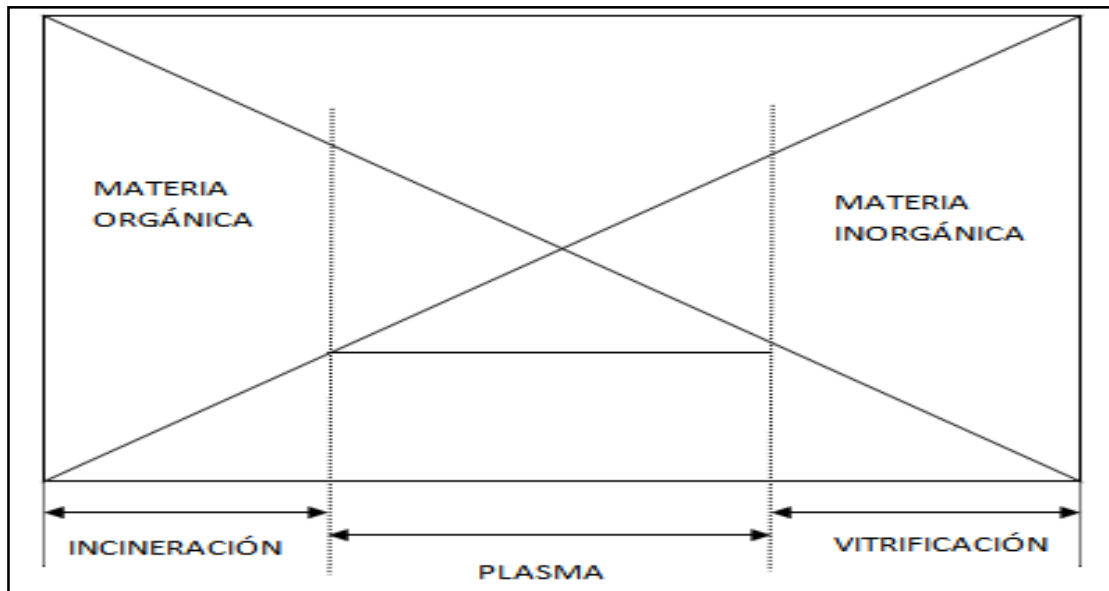
La amplia y gran concentración de energía que es capaz de generar una antorcha de plasma ha abierto un nuevo campo en el área de tratamiento de residuos. En primer lugar hay que advertir que esta tecnología tiene costos elevados en su instalación y operación y, por tanto los residuos que se sometan a ella deberán cumplir dos requisitos previos:

- Desde el punto de vista técnico, se deben tratar residuos que presenten un alto contenido de materia orgánica e inorgánica. Con la primera fracción se lleva a cabo un proceso de pirolisis y gasificación que genera gases y vapores que posteriormente deberán ser tratados (oxidados). Con la fracción inorgánica, debido a las altas temperaturas generadas, se facilita la fusión.
- Desde el punto de vista económico, es preferible tratar residuos de los denominados *tóxicos y peligrosos* ya que, al tratarse, este tipo de residuos se puede ingresar una cantidad importante de dinero por concepto de tratamiento que ayudará a mantener la rentabilidad de la operación de la instalación.

Cuando el residuo presenta naturaleza tanto orgánica como inorgánica, la aplicación del plasma térmico puede ser una buena opción para su tratamiento, obteniendo gas de síntesis y material vitrificado (slag) como productos finales. La Figura 13 muestra las regiones donde se recomienda el uso del plasma térmico de acuerdo con la naturaleza de los residuos.



Figura 13. Regiones de aplicación del plasma térmico como función del tipo de residuos sólidos

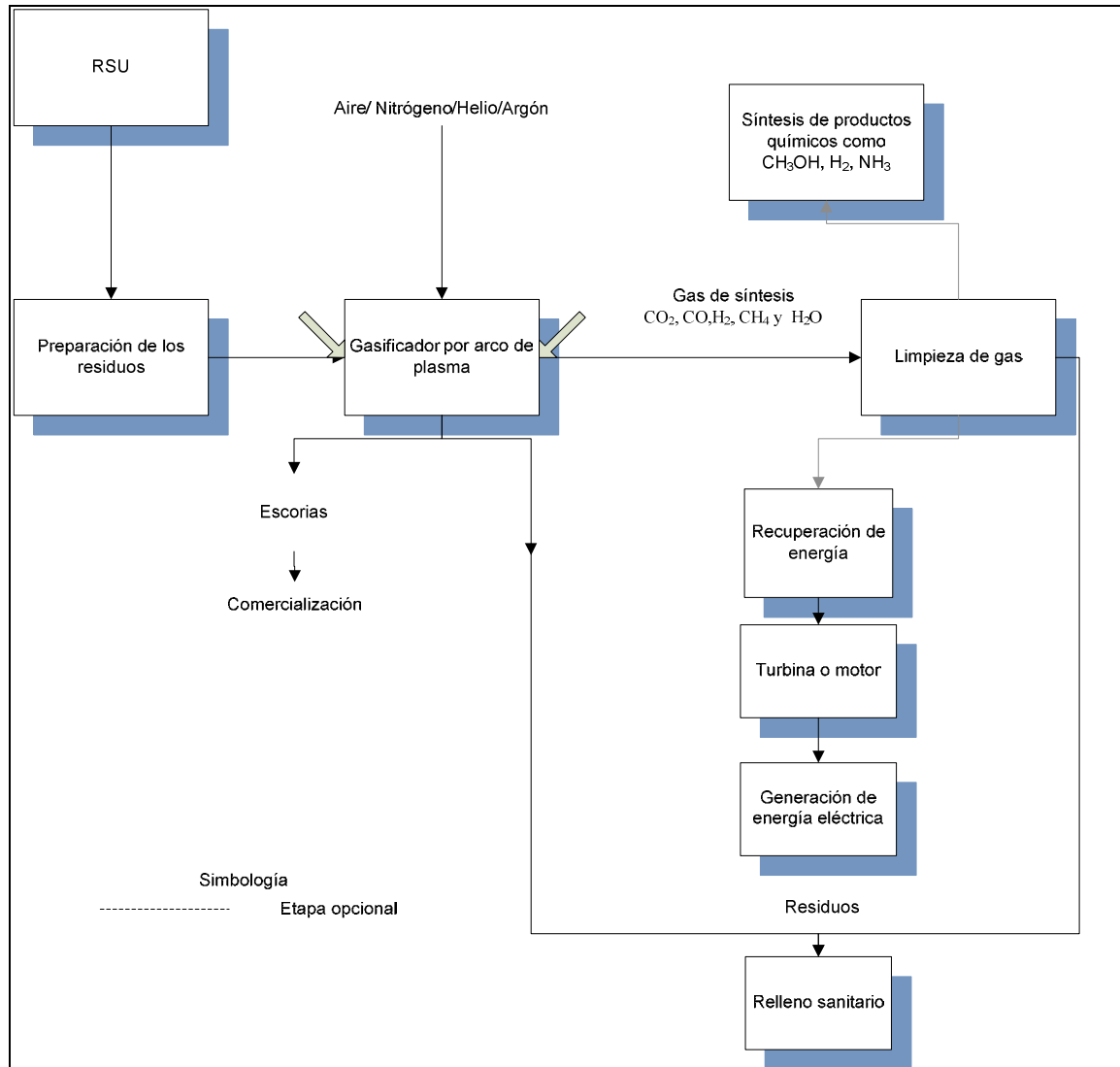


Fuente: Elaboración a partir de (47)

De manera general el proceso de gasificación por antorcha de plasma está integrado por una sección de acondicionamiento de los residuos a alimentar, conforme a los requerimientos de entrada del reactor de plasma; la unidad de reacción, el sistema de limpieza de gases y la sección de recuperación de energía (Ver Figura 14)



Figura 14. Diagrama de flujo del proceso de gasificación por arco de plasma



Fuente: Elaboración propia



3.3.1 Tipos de antorchas para generación de plasma

De acuerdo con el tipo de electrodos empleado, existen dos tipos de antorchas típicas: de arco no transferido y de arco transferido. La antorcha de arco no transferido está constituida por dos electrodos los cuales no participan en el proceso, únicamente tienen la función de generar el plasma. Se inyecta una pequeña cantidad de agente ionizante y la flama de plasma se extiende hasta la punta de la antorcha. El par de electrodos pueden tener diferente geometría; una barra cilíndrica (cátodo) y un cilindro hueco (ánodo) o dos cilindros coaxiales que pueden operar con polaridades opuestas.

Los electrodos generalmente son enfriados con agua de enfriamiento y muchos diseños utilizan campos magnéticos axiales generados por el paso de una corriente directa (CD) a través de un embobinado que rodea a los electrodos. Las antorchas de arco no transferido están disponibles en el mercado en niveles de potencia entre 1 kW y 6 MW, con intervalos de eficiencia térmica entre el 50% y el 90%, pudiéndose incrementar si se aumenta el flujo de gas de plasma, pero esto conlleva a tratamientos de mayor costo para los gases de descarga.

Por otra parte, en las antorchas de arco transferido uno de los electrodos (ánodo) es externo, es decir, el arco es transferido hacia el ánodo externo comúnmente constituido por la superficie de la materia prima a tratar como material conductor; esto permite el uso de flux térmicos extremadamente elevados para el tratamiento de diversos compuestos (fundición de metales, vitrificación del *slag*, entre otros) logrando un producto sólido inerte. El cátodo consumible, generalmente grafito, tiene la desventaja de contaminar los productos con carbón y requiere ser sustituido continuamente, mientras que los electrodos no consumibles tienen un tiempo de vida mayor pero requieren de mayor atención para prevenir la erosión causada por los fluidos que se pueden filtrar dentro de la antorcha(48).



3.3.2 Productos obtenidos y recuperación de energía

Tres son los productos principales obtenidos del tratamiento de los residuos sólidos urbanos mediante la tecnología de gasificación por antorcha de plasma: gas de síntesis (*syngas*), *slag* y energía en forma de calor.

Gas de síntesis (Syngas)

El gas de síntesis o *syngas* es el nombre dado a una mezcla de gases compuesta en su mayor proporción de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂). El gas de síntesis es obtenido mediante reacciones de oxidación parcial en condiciones de operación estrictamente controladas, utilizando un gas de plasma (agente gasificante) como vapor de agua, dióxido de carbono, aire u oxígeno, o algunas mezclas de dos o más agentes gasificantes; escogido de acuerdo con la composición y calidad del *syngas* deseadas(49). En la Tabla 20 se indica la composición del gas de síntesis de acuerdo al tipo de agente gasificante utilizado(50) .

Tabla 20. Composición del gas de síntesis obtenido dependiendo del agente gasificante utilizado

Agente gasificante	PCS (MJ/m ³)	Composición del gas obtenido (% volumen)						USO
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂	
Aire	<6	16	20	12	2	50	—	Combustible
Oxígeno	10-20	32	48	15	2	3	—	Combustible gas de síntesis
Vapor de agua	10-20	50	20	22	6	—	2	Combustible gas de síntesis

Fuente: Modificado de (50)

El gas de síntesis puede ser quemado directamente en una caldera o se puede pasar por un sistema de limpieza de gas y utilizarse en un motor o en una turbina de gas. Si se quema en una caldera, los gases de escape se limpian después de la combustión en un sistema similar al utilizado en las



plantas de incineración. El flujo de gases calientes a través de la caldera produce vapor, el cual puede ser utilizado para la generación de energía en una turbina de vapor convencional. En cambio si el gas de síntesis es destinado a una turbina o motor éste debe ser limpiado antes de entrar al proceso.

Escorias (Slag)

El producto sólido obtenido de este proceso es conocido como slag, un material inerte cuya forma física depende del tratamiento recibido durante su enfriamiento. Si el slag es enfriado mediante aire, se forma un sólido rocoso vitrificado de color negro parecido a una piedra de obsidiana, el cual puede ser utilizado como carga para la fabricación de concreto o asfalto. Asimismo, el slag fundido puede ser moldeado de manera tal que pueda ser utilizado como material de construcción en forma de ladrillos o piedras de pavimentación.

Energía térmica

El calor generado por una instalación de plasma es considerable, medido en miles de grados centígrados. El calor que proviene del slag fundido ayuda a mantener la temperatura dentro del reactor, mientras que una parte del calor proveniente de los gases puede ser utilizado para generar vapor, cuya energía térmica puede mover turbinas y generar electricidad.

3.3.3 Residuos del proceso

Ya que el sistema de arco de plasma opera a temperaturas tan elevadas tiene el potencial de mejorar el rendimiento de conversión de los residuos a gas, con lo que se reducen la cantidad de cenizas.

La cantidad de ceniza producida será de aproximadamente 15 a 20 por ciento en peso de la materia prima alimentada (por lo cual debe de contarse con un sitio de disposición final), con la eliminación de los metales y el vidrio a la entrada del proceso se puede reducir este valor hasta aproximadamente 5%(51).



3.3.4 Costos

Actualmente es difícil estimar los costos de la gasificación por arco de plasma principalmente por dos razones, la primera radica en que la tecnología de arco de plasma tiene muchas variantes, existen diversas formas de generar el arco de plasma, de utilizar el *syngas* generado así como diversas configuraciones de limpieza de gases. La segunda razón es que hay una limitada historia del uso del arco de plasma para la conversión térmica de los residuos.

La única planta de la que se tiene más información y que ha utilizado durante mayor tiempo la gasificación por arco de plasma para el tratamiento de residuos se encuentra en Utashinai, Japón. Inició sus operaciones en el año 2003 y cuenta con una capacidad instalada de 220 toneladas al día. Esta planta reporta un costo de inversión de 65,000,000 dólares y costos de operación y mantenimiento anual de 5,500,000 dólares (52).



3.4 Pirólisis

La pirólisis (también conocida como destilación destructiva, termólisis o cracking) consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante. Los productos que se obtienen de la pirólisis son tres: una fracción gaseosa, una líquida y una sólida. La fracción gaseosa está compuesta principalmente de CO, CO₂, H₂, CH₂ y C₂H₆, la fracción líquida la constituyen los productos más pesados que no pueden permanecer en estado gaseoso y que condensan como ácidos orgánicos, fenoles, alcoholes, aldehídos, cetonas, etc.

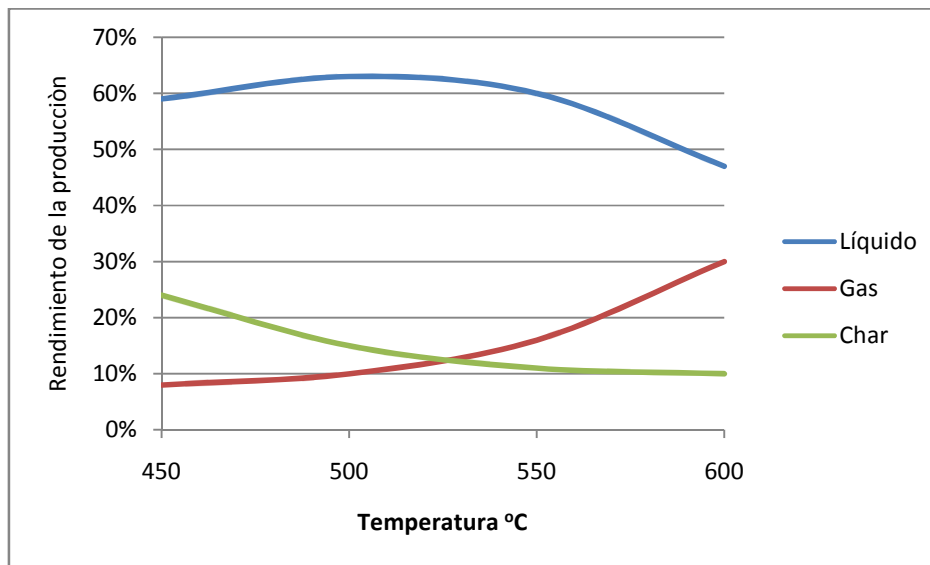
La fracción sólida suele estar formada por un residuo carbonoso llamado “*char*”, en el que se pueden encontrar los materiales originales a pirolizar, que por ciertas condiciones de operación sólo se fundieron y se volvieron a solidificar.

La proporción en la que estas fracciones son generadas depende de las propiedades de los residuos a tratar y de los parámetros de operación del equipo, como la presión, la temperatura, el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento, entre otras. Por ejemplo en la pirólisis de combustible derivado de RSU a una temperatura de 600°C y con una velocidad de calentamiento de 20°C/min se producirá 35.2 % de *char*, 49.2% de líquidos aceitosos y 18.8% de gas de pirólisis (53). En la Fuente: Modificado de

se muestran las variaciones en las cantidades de productos que se generan en el proceso de pirólisis de la madera, provocadas por la modificación en la temperatura de reacción; se observa que al aumentar la temperatura de reacción se favorece la producción de gas de pirólisis y se disminuye la producción de *char* y de la fracción líquida.



Figura 15. Rendimiento típico de producción de fracción líquida, sólida y gaseosa de la pirólisis de la madera. (% en peso de alimentación en base seca)



Fuente: Modificado de (54)

En contraste con la combustión y la gasificación, el proceso de pirólisis es altamente endotérmico. Desde el punto de vista de aportación de calor el proceso de pirólisis se divide en dos grandes grupos, los sistemas autotérmicos y los sistemas alotérmicos. En los sistemas autotérmicos la energía la proporciona la combustión de parte de la carga, es decir por calentamiento directo. En este tipo de sistemas las reacciones de termorreducción deben realizarse en un medio químicamente inactivo o preferentemente en atmósfera reductora ya que cualquier introducción de oxígeno provocaría la combustión de una parte del combustible. En los sistemas alotérmicos la transmisión de calor se lleva a cabo por conducción y radiación de las paredes, la fuente de energía suele ser la combustión de los gases producidos o bien del propio char, este sistema de suministro de calor es el más utilizado ya que presenta notables ventajas sobre el calentamiento directo como se muestra en la Tabla 21. El intervalo de temperatura a la que se lleva a cabo la pirólisis va de los 300 °C a los 900 °C(39).



Tabla 21. Comparación de los sistemas de calentamiento directo e indirecto

Calentamiento directo	Calentamiento indirecto
<p>Mejor eficiencia de la transmisión de calor No se puede independizar la temperatura de pirolisis de la de combustión Los gases de pirolisis y de combustión se mezclan El revestimiento interno se debe de diseñar para una temperatura de 1250 °C debido al incremento de la temperatura por combustión</p>	<p>Se necesitan intercambiadores de calor Las temperaturas de pirolisis se respetan Los volátiles y vapores se independizan mejor para la futura valorización Las paredes no se pueden aislar. La máxima temperatura de pared es de aproximadamente 750 °C Las grandes dilataciones exigen sistemas de estanqueidad sofisticados La alta temperatura y los gases ácidos degradan el metal y lo someten a estrés</p>

Fuente: Elaboración propia a partir de (55)

Dependiendo de las condiciones a las cuales se lleve a cabo el proceso se pueden distinguir tres tipos de pirólisis:

- Lenta (carbonización)

Este tipo de pirólisis es usada para maximizar la cantidad de *char* que es producido, requiere una reacción lenta y bajas temperaturas.

- Convencional

Se lleva a cabo a temperaturas de entre 400 a 900 °C sin darle preferencia a la formación de algún producto en especial, se lleva a cabo en equipos rotatorios o de lecho fluidizado, y en algunos casos en hornos de parrillas

- Rápida/ Flash

Este tipo de pirólisis es utilizado para maximizar la generación de productos gaseosos o líquidos, y es la más ampliamente estudiada y aplicada para la conversión de los RSU.

En la Tabla 22 se muestran las condiciones de proceso para los tipos de pirólisis mencionadas anteriormente y los productos que se obtienen mayoritariamente.



Tabla 22. Condiciones de proceso de las diferentes tipos de pirólisis y rendimientos típicos de los productos de la pirólisis de madera

Técnica de pirólisis	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Temperatura °C	Presión (bar)	Líquido	Char	Gas
Lenta	Horas-días	Muy lenta	300-500	1	30%	35%	35%
Convencional	5-30 min	Media	700-900	1	50%	20%	30%
	Horas	Lenta	400-600	1			
Flash	0.1-2 s	Rápida	400-650	1	75%	12%	13%
	<1s	Rápida	650-900	1			

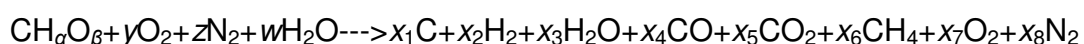
Fuente: Elaborado a partir de (56) y (57)

Los productos de pirólisis pueden ser utilizados para la generación de energía eléctrica o para la síntesis de productos químicos (ver Figura 17)

La aplicación de la pirólisis a los RSU es un desarrollo reciente, en particular se está investigando sobre la producción de aceites, con el objetivo de usarlos directamente como combustible. Este proceso no es un sistema terminal para la valorización de los residuos y es necesario oxidar los gases y vapores que se emanan del proceso para obtener como producto principal CO₂ y H₂O.

Las reacciones de pirólisis son extremadamente complejas ya que se combinan mecanismos de reacción tanto físicos como químicos, en la actualidad existen pocas investigaciones acerca de los mecanismos de reacción de la pirólisis de los RSU.

Una reciente investigación (58) ha propuesto que la reacción global de la pirólisis de los RSU es:





Donde: $CH_{\alpha}O_{\beta}$ es la fórmula química de los RSU, y, z y w los moles de los otros reactantes y x_i los moles de los productos de reacción.

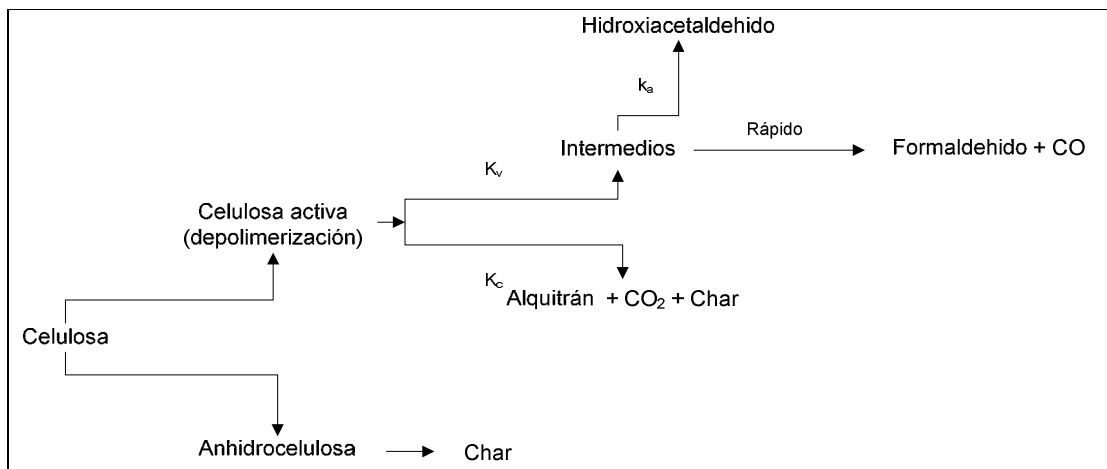
En la Figura 16 se muestra un mecanismo que ha sido propuesto para la pirólisis de la celulosa

$$k_v = 3.2 \times 10^{14} \exp\left(-\frac{47300}{RT}\right) s^{-1};$$

$$k_c = 1.3 \times 10^{10} \exp\left(-\frac{366000}{RT}\right) s^{-1}$$

$$k_a = 8.8 \times 10^{11} \exp\left(-\frac{39000}{RT}\right) s^{-1}$$

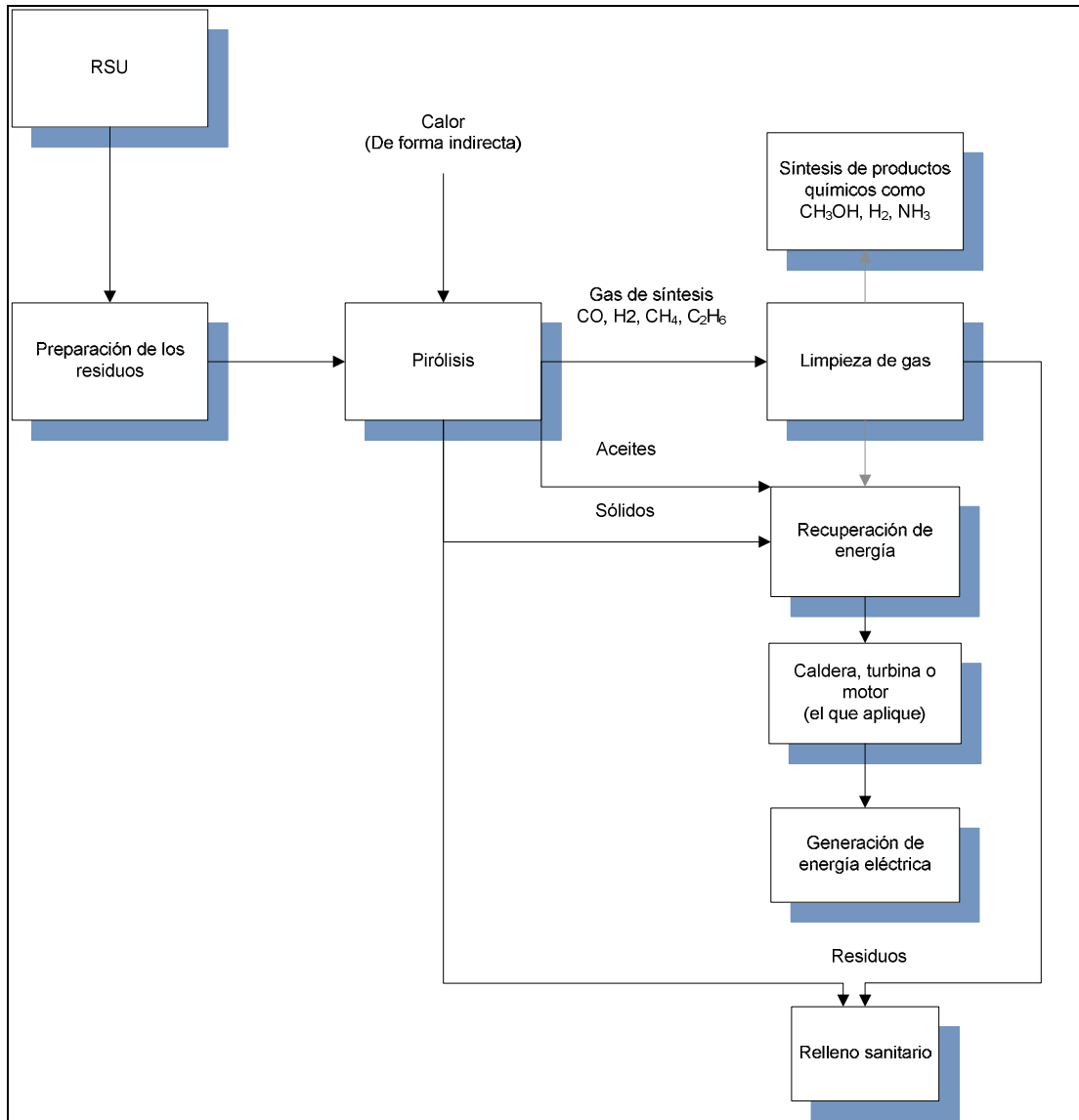
Figura 16. Mecanismo de pirólisis de la celulosa propuesto por Banyasz, 2008 (las energías de activación están expresadas en cal/mol)



Fuente: Modificado de (59)



Figura 17. Diagrama de flujo del proceso de pirólisis



Fuente: Elaboración propia

3.4.1 Tipos de reactores de pirólisis

El corazón del proceso de pirólisis es el reactor, el cual comúnmente representa del 10 al 15 % de los costos de inversión totales (57). Existen diferentes tipos de reactores de pirólisis, los cuales se mencionan a continuación:



Tabla 23. Tipos de reactores de pirólisis

Tipo de reactor	Método de calentamiento	Modo de transferencia de calor	Velocidad de transferencia
Ablativo	Superficie caliente	Directo	Alta
Ciclónico	Por medio de gases de combustión	Directo	Alta
	Calentamiento de las paredes	Indirecto	Baja
Lecho fluidizado	Por medio de gases de combustión	Directo	Alta
	Gasificación parcial	Directo	Alta
	Tubos de fuego	Indirecto	Moderado
Flujo arrastrado	Productos de combustión	Directo	Alta
	Arenas calientes reutilizadas	Directo	Alta
Lecho fijo	Productos de combustión	Directo	Bajo
	Gas caliente	Indirecto	Bajo
	Gasificación parcial	Directo	Bajo
Lecho de movimiento horizontal	Productos de combustión	Directo	Bajo
Horno rotatorio	Calentamiento de paredes	Indirecto	Bajo
Vórtice	Calentamiento de pared	Indirecto	Alta

Fuente: Elaborado a partir de (54)

3.4.2 *Productos obtenidos y recuperación de energía*

La recuperación de energía en el proceso de pirólisis se da a través de la valorización de las tres principales fracciones de productos que se obtienen (líquidos aceitosos, gas de pirólisis y el residuo carbonoso llamado *char*)

Líquido aceitoso

El líquido aceitoso generado puede ser utilizado directamente en sistemas convencionales de generación de energía eléctrica como motores de diesel y turbinas de gas, su poder calorífico se encuentra entre los 25 MJ/kg para los aceites derivados de la pirólisis de los RSU y de 42 MJ/kg para la pirólisis de los residuos de llantas. Los líquidos aceitosos son más fáciles de transportar que los



sólidos y los gases y esto es importante en las aplicaciones de combustión y la adaptación de los equipos existentes.

Pruebas de combustión indican que este aceite puede ser quemado de manera eficaz en calderas o motores, estándar o modificados, obteniendo un rendimiento similar a los combustibles comerciales. Sin embargo, los aceites obtenidos tienen que ser tratados para evitar problemas en la combustión, ya que contienen un alto contenido de agua (perjudiciales para la ignición), ácidos orgánicos (corrosivos para los materiales de construcción común), y sólidos (pueden bloquear o erosionar los álabes de las turbinas) (60). Otra aplicación de los líquidos de pirólisis es para la producción de sustancias químicas como resinas, también se ha encontrado que se pueden utilizar como agentes tensoactivos para preparación de emulsiones acuosas de fracciones de petróleo crudas y destiladas (61).

Gas de pirólisis

Como se mencionó anteriormente, el gas obtenido de la pirólisis de RSU está compuesto mayoritariamente por dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno, metano y bajas concentraciones de otros gases hidrocarbonados. Este gas tiene un poder calorífico de alrededor de 18 MJ/m^3 que puede ser utilizado para proveer de los requerimientos de energía para el proceso. Este gas de pirólisis comúnmente es quemado para generar vapor que alimenta a una turbina de vapor y para generar electricidad(56).

Char

Una de las propiedades del *char* obtenido de la pirólisis de RSU es que tiene un poder calorífico relativamente alto de alrededor de 19 MJ/kg , que lo hace muy factible de ser utilizado directamente como combustible (56).

3.4.3 Residuos del proceso



Varios cientos de diversos residuos son producidos durante la pirólisis, incluso muchos de ellos no han sido identificados. Se pueden clasificar en tres grandes grupos(62): partículas sólidas, gases no condensables y compuestos condensables u orgánicos piroleñosos

Partículas sólidas

Con los gases emitidos se produce el arrastre de partículas sólidas, en comparación con las producidas en el proceso de incineración estas partículas son de mayor tamaño lo que facilita su remoción con equipos convencionales de tratamiento de gases (como filtros y ciclones)

Gases no condensables

Gases nocivos como CO, CO₂, hidrocarburos (metano, etano, etileno,acetileno, propano y butilenos) y H₂

Compuestos condensables u orgánicos piroleñosos

Estas sustancias se desprenden en forma de vapor o aerosoles dependiendo de la temperatura de emisión y el vapor de saturación de los compuestos emitidos. Cuando condensan se forma un líquido heterogéneo que puede separarse en dos fases:

3.4.4 Costos

La unión europea ha estimado los siguientes costos para una planta de 150,000 toneladas al año, aunque advierte que son hipotéticos debido a que no existen plantas de pirólisis a esta escala.

Tabla 24. Costos estimados del proceso de pirólisis

Costos	
Costos de inversión por tonelada (USD/ton)	920
Costos de operación por tonelada (USD/ton)	84

Fuente: A partir de (63)



4. Descripción de trenes de procesos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos

En este capítulo se describen los trenes de proceso de distintas tecnologías de incineración, de gasificación tanto convencional como por arco de plasma y de pirólisis, como ejemplo de su aplicación en el mundo. Se han seleccionado los trenes cuya alimentación se refiere a RSU y cuyo producto del proceso es, entre otros, la generación de energía eléctrica. Al final del capítulo se presenta una tabla resumen en la que se compara la información técnica y económica recopilada para las diferentes tecnologías y gráficos en los que se muestran las emisiones reportadas de las tecnologías y se comparan con los estándares mexicanos, estadounidenses, europeos y japoneses.

4.1 Incineración

4.1.1 TIRMADRID. España



El Incinerador de residuos sólidos urbanos de Valdemingómez es una parte del Parque Tecnológico de Tratamiento Integral de Residuos Sólidos Urbanos del Ayuntamiento de Madrid (TIRMADRID) y constituye un esfuerzo del gobierno Madrileño por llevar a cabo una gestión integral de los residuos sólidos.

Tiene tres accionistas: Urbaser (servicios urbanos) 66%, Endesa (compañía eléctrica) 15% y unión Fenosa (compañía eléctrica) 19 %

Su construcción empezó en abril de 1991 y en el año 1996 inicio sus operaciones, tiene una vida útil de 23 años. La empresa TIRMADRID emplea cerca de 100 trabajadores en horarios de trabajo de 2 turnos diarios en las diferentes instalaciones.



El parque tecnológico de Valdemingómez trata 1,200 toneladas de residuos al día (cerca del 30% del total de RSU generados en Madrid) y se lleva a cabo en dos fases: 1) Recuperación de materiales reaprovechables y reciclables y 2) valorización energética de la fracción de rechazo de los RSU, como se muestra en la Figura 18

Descripción del proceso

El proceso comienza con la llegada de los camiones recolectores de RSU a la planta, éstos son pesados antes de descargar su contenido en las fosas de recepción, puentes grúas y pulpos depositan el contenido en tolvas en cuyo fondo están situados 4 alimentadores de placas que dan un flujo constante a los alimentadores vibratorios, en la que los empleados separan vidrio, cartón y residuos voluminosos. Posteriormente se lleva a cabo un cribado con el que se obtienen dos fracciones, una de tamaño mayor a 10 cm y otra menor a 10 cm.

Los residuos menores de 10 cm son enviados a una línea donde se separan manualmente los trozos pequeños de vidrio, y mediante un equipo de separación magnética se recuperan los metales. La fracción que se obtiene tiene un alto contenido de materia orgánica que se envía a una unidad de fermentación, en la que se obtiene, después de un periodo de 8 a 10 semanas, composta que posteriormente se vende como abono.

Por otro lado la fracción de tamaño mayor a 10 cm pasa por otro sistema de separación en la que se retiran los productos susceptibles de recuperación y mediante un separador magnético se recuperan los materiales férricos. Todos los productos recuperados son embalados y transportados hacia empresas de reciclaje.

Después de todas las selecciones realizadas se obtiene un rechazo del cual ya no es posible recuperar materiales, este rechazo corresponde al 42 % del total de los RSU y sirve como material combustible de alto poder calorífico.



El sistema de recuperación de energía está constituido por 3 líneas de tratamiento de las que se tratan aproximadamente 660 toneladas de basura al día, es decir la capacidad nominal de cada línea es de 220 toneladas, cada línea cuenta con un horno de lecho de arena fluidizado burbujeante, una caldera de recuperación y un sistema de limpieza de gases (64).

La fracción de rechazo, con un poder calorífico promedio de aproximadamente 14,644 kJ/kg, entra al horno mediante las tolvas de alimentación, el aire es introducido por toberas, en el horno los gases se mantienen a temperaturas cercanas a los 910 °C.

Los gases calientes producto de la combustión entran en la cámara de postcombustión en la que son oxidados a una temperatura de al menos 850 °C y son mantenidos por al menos 2 segundos. Se utiliza diesel como combustible auxiliar para mantener la temperatura.

Los gases de salida de la cámara de postcombustión son enviados a una caldera para generar vapor.

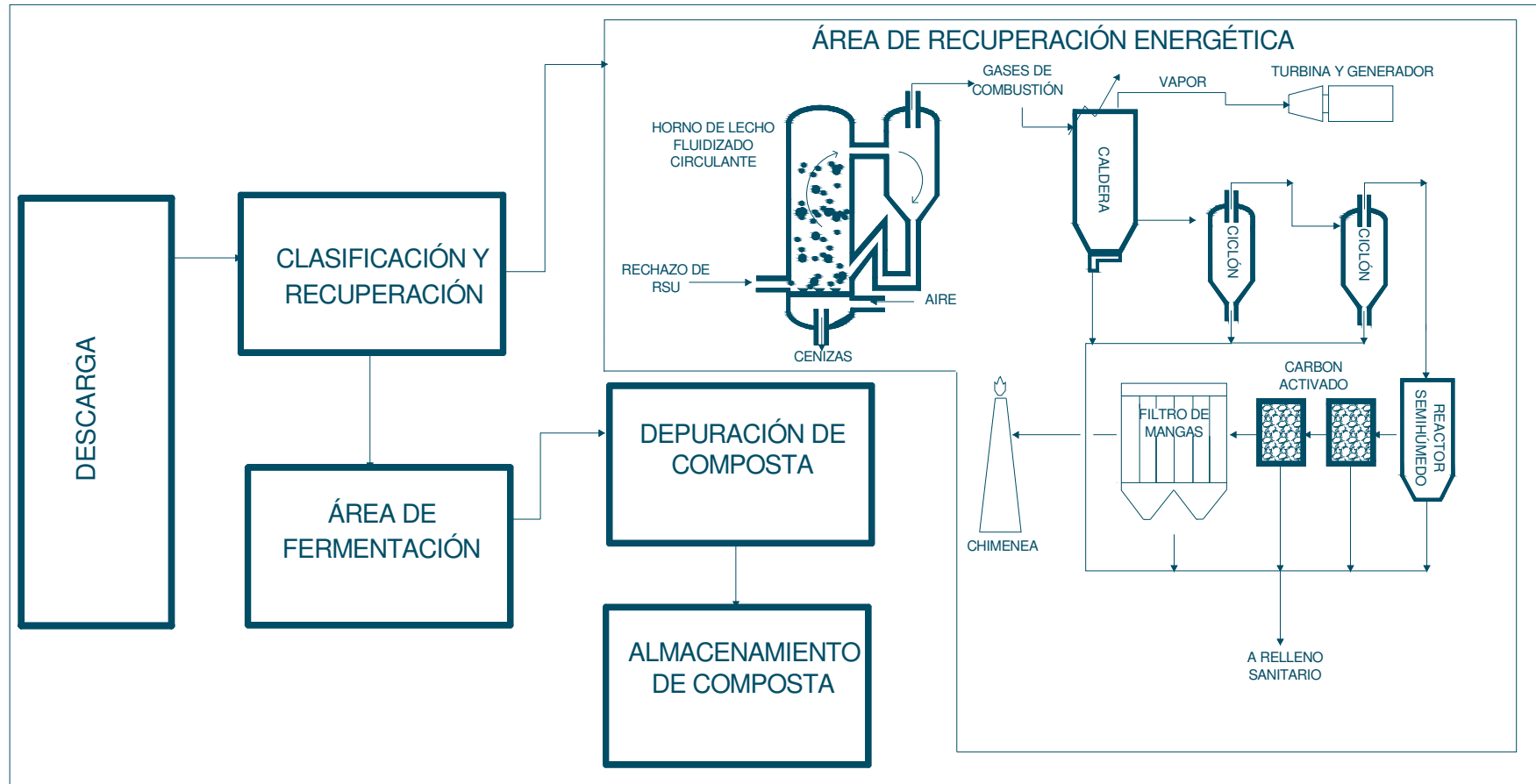
El vapor generado en las 3 calderas es ingresado a una turbina de vapor de 29 MW para producción de energía.

En cuanto a los gases de salida de la caldera éstos son enviados a un sistema de limpieza de gas frío constituido por 2 ciclones, un reactor semihúmedo, 2 inyecciones de carbón activado y un filtro de mangas.

Finalmente en el proceso se obtiene un rechazo final que lo constituye principalmente aquella basura no recuperable ni reciclable en las fases anteriores de tratamiento que finalmente tiene que ser depositada en el vertedero de Valdemingómez que se encuentra adyacente a la planta de tratamiento, esta fracción constituye cerca del 10 % de los residuos ingresados a tratamiento térmico (64).



Figura 18. Proceso de incineración de RSU en la planta de TIRMADRID



Fuente: Elaboración propia



4.1.2 SYTCOM. Francia



El centro de tratamiento denominado Ivry Paris XIII cuenta con una planta de reciclado, una planta de incineración y un centro de clasificación. Dicho centro es una instalación del Sindicato Intermunicipal de tratamiento de residuos sólidos urbanos de la unión parisiense, SYCTOM por sus siglas en francés; que en 2008 dispuso los residuos

domésticos de 84 municipios repartidos en cinco regiones: Paris, Yvelines, Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis y Val-de-Marne. El SYCTOM trató 4.48 millones de toneladas de residuos sólidos mixtos en 2008, que incluyen domésticos, de manejo especial, muebles y provenientes de actividades comerciales. SYCTOM cuenta con 3 plantas de incineración: Isséane, Saint-Ouen e Ivry Paris XIII

La planta de incineración Ivry recibe los residuos de 15 municipios, fue instalada en 1969 y sufrió una remodelación en 1997. Tiene una capacidad de 600,000 toneladas por año. En el año 2007 la planta valorizó cerca del 90% de los residuos que ingresaron(65).

Descripción del proceso

A continuación se describe el proceso de conversión térmica de los residuos sólidos urbanos que se lleva a cabo en Ivry Paris XIII y el cual está representado en la Figura 19.

El proceso comienza con la llegada de los residuos al centro, estos residuos provienen de una población de alrededor de 1,200,000 habitantes, que son vaciados en una fosa [1]. A continuación los residuos, con un PCI de aproximadamente 8,370 kJ/kg, son alimentados a uno de los dos hornos de rejillas con los que cuenta la planta. En estos hornos los residuos son incinerados a una



temperatura que se mantiene alrededor de los 900 °C [2]. En la parte baja del horno se recuperan materiales pesados que posteriormente se usan en obras públicas.

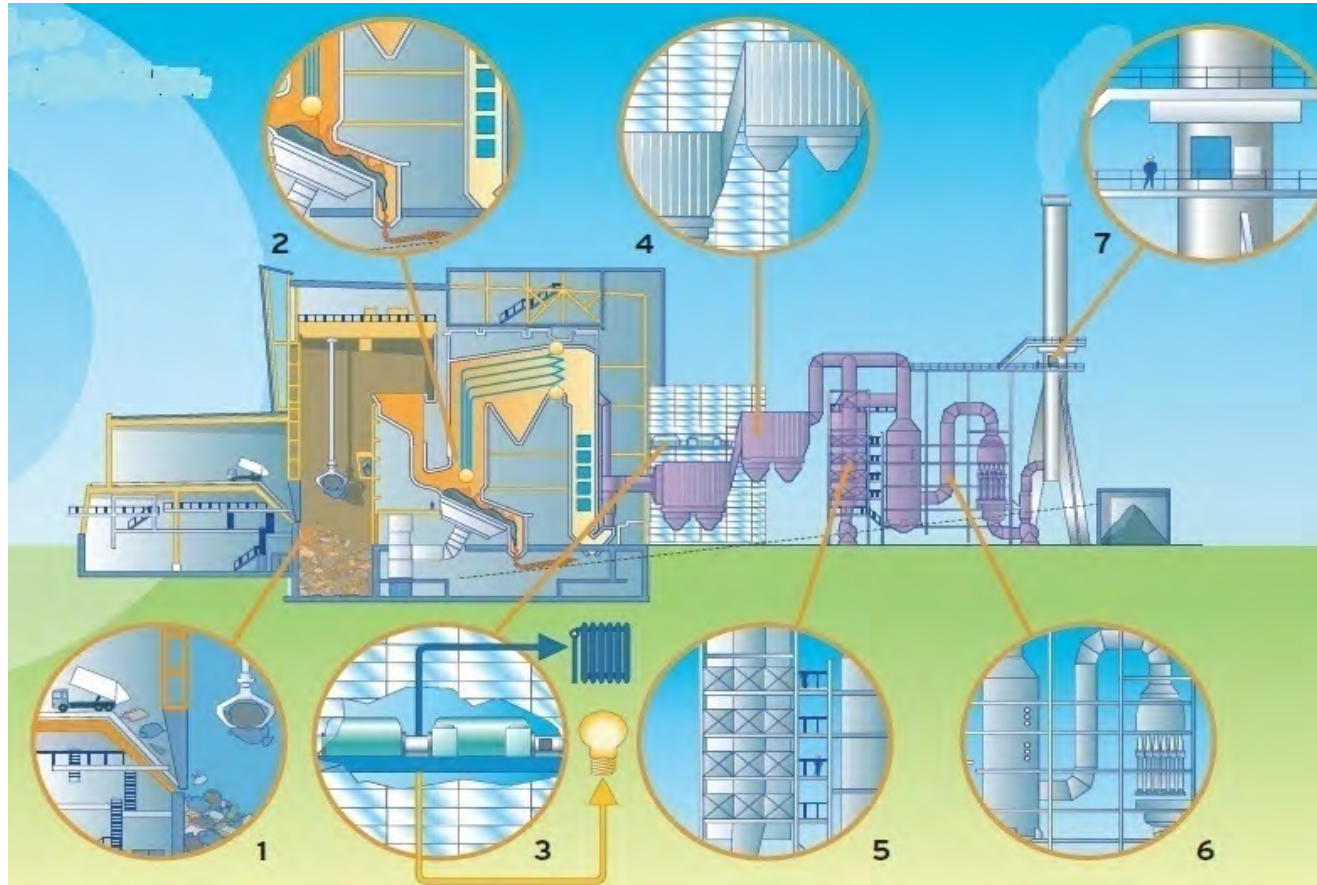
Los gases calientes de combustión se introducen a una caldera para generar vapor, una parte es vendida a la Compañía Parisina de Calefacción Urbana lo que permite dar calefacción a alrededor de 70,000 hogares al año y otra parte es enviada a una turbina de vapor para generar electricidad [3] la cual es utilizada tanto para el funcionamiento del centro como para su venta a la comunidad.

Los gases de salida son enviados a una primera etapa de limpieza en donde son removidas las partículas en suspensión mediante precipitadores electrostáticos [4], una segunda etapa la constituye un reactor catalítico en donde se eliminan dioxinas, furanos y óxidos de nitrógeno mediante un tratamiento catalítico a 250 °C [5], después son tratados mediante un filtro de partículas finas y lavados a fin de remover los componentes ácidos (HCl y óxidos de azufre)[6].

Este proceso de limpieza permite que las emisiones atmosféricas se mantengan por debajo de los límites fijados por la unión europea, el análisis de las emisiones es llevado a cabo en la chimenea donde se registran los componentes y las emisiones que son liberadas a la atmósfera; éstos datos son analizados y remitidos a la autoridades competentes(66).



Figura 19. Proceso de incineración de RSU en la planta de Ivry Paris XIII



Fuente: Tomado de (66)



4.2 Gasificación

4.2.1 NIPPON STEEL. Japón

La Compañía Nippon Steel se fundó en el año de 1970, y su esquema de negocios se enfoca principalmente en la metalurgia, el desarrollo urbano, productos químicos, nuevos materiales, la ingeniería y la construcción.

La división de ingeniería de la compañía (Nippon Steel Engineering Co. Ltd) es la encargada de brindar soluciones para el reciclaje y la disposición de residuos, poseen una tecnología llamada *Direct Melting System*

(Sistema de fusión directo) en el cual diversos tipos de residuos son fundidos en un sólo paso, las cenizas son convertidas en *slag* y es posible la recuperación de metales para ser reciclados. Actualmente en Japón existen cerca de 25 plantas operando con esta tecnología y al menos 5 plantas están por iniciar operaciones. De las plantas en operación una de las más representativas se encuentra ubicada en la ciudad de Akita, en Japón.

La ciudad de Akita construyó el *Centro total del medio ambiente* para ser la planta central de tratamiento de residuos de la ciudad, inició su operación en el año 2002, estas instalaciones son las más grandes en tecnología de gasificación y fusión en Japón, con una capacidad anual de procesamiento de 160,600 toneladas de residuos(67).

La planta trata residuos sólidos urbanos (RSU), lodos de plantas de tratamiento de agua y residuos de incineradoras.

En el centro se tratan aproximadamente 89% de RSU, combinados con 3% de residuos de incineradoras, y 8% de lodos. Obteniendo un 11% de slag, 1.8% de metales y cerca de 3% de cenizas inertes(68) .



Descripción del proceso

El proceso utiliza un gasificador de lecho mixto con inyección de aire enriquecido con oxígeno en la sección de fusión. Se agrega coque a los residuos de entrada (45.35 kg/ton de RSU o 5% por peso), para ayudar a proveer energía para la completa fusión de las cenizas. También se agrega caliza para darle un pH regulado al fundido (aproximadamente 5% en peso de residuos alimentados) (68).

El horno de fusión de este sistema es un horno de eje que recibe desde la parte superior los residuos, el coque y la piedra caliza.

El eje del horno se compone de cuatro zonas: la zona de secado y precalentamiento mantenido alrededor de 400 °C, la zona de descomposición térmica y gasificación con una temperatura de entre 400°C a 1,000°C, la zona de combustión (1,000- 1,700 °C) y la zona de fusión (de 1,700 a 1,800 °C). Los residuos secos descienden gradualmente a través del horno y son alimentados por la zona de descomposición térmica y de gasificación, donde las sustancias orgánicas se gasifican. Los gases producidos son descargados en la parte superior del horno y son totalmente quemados en la cámara de combustión (ver Figura 20)

Después los gases de escape calientes de la cámara de combustión son enviados a la caldera de calor residual con el fin de recuperar el vapor e introducirlo a una turbina para la generación de electricidad. Las cenizas y materia inorgánica que se mantienen a pesar de la descomposición térmica descienden con el coque a la zona de combustión y de fusión.

El coque reacciona en presencia del aire inyectado en el horno a través de toberas entrando en una atmósfera reductora de alta temperatura, con el que las cenizas y sustancias inorgánicas son completamente fundidas.

El fundido caliente, obtenido de este modo, es vertido por el sistema a través de un orificio de salida ubicado en la parte inferior del horno y pasa a la etapa de



granulación aquí el fundido es enfriado y solidificado rápidamente formando una mezcla granular de *slag* y metal.

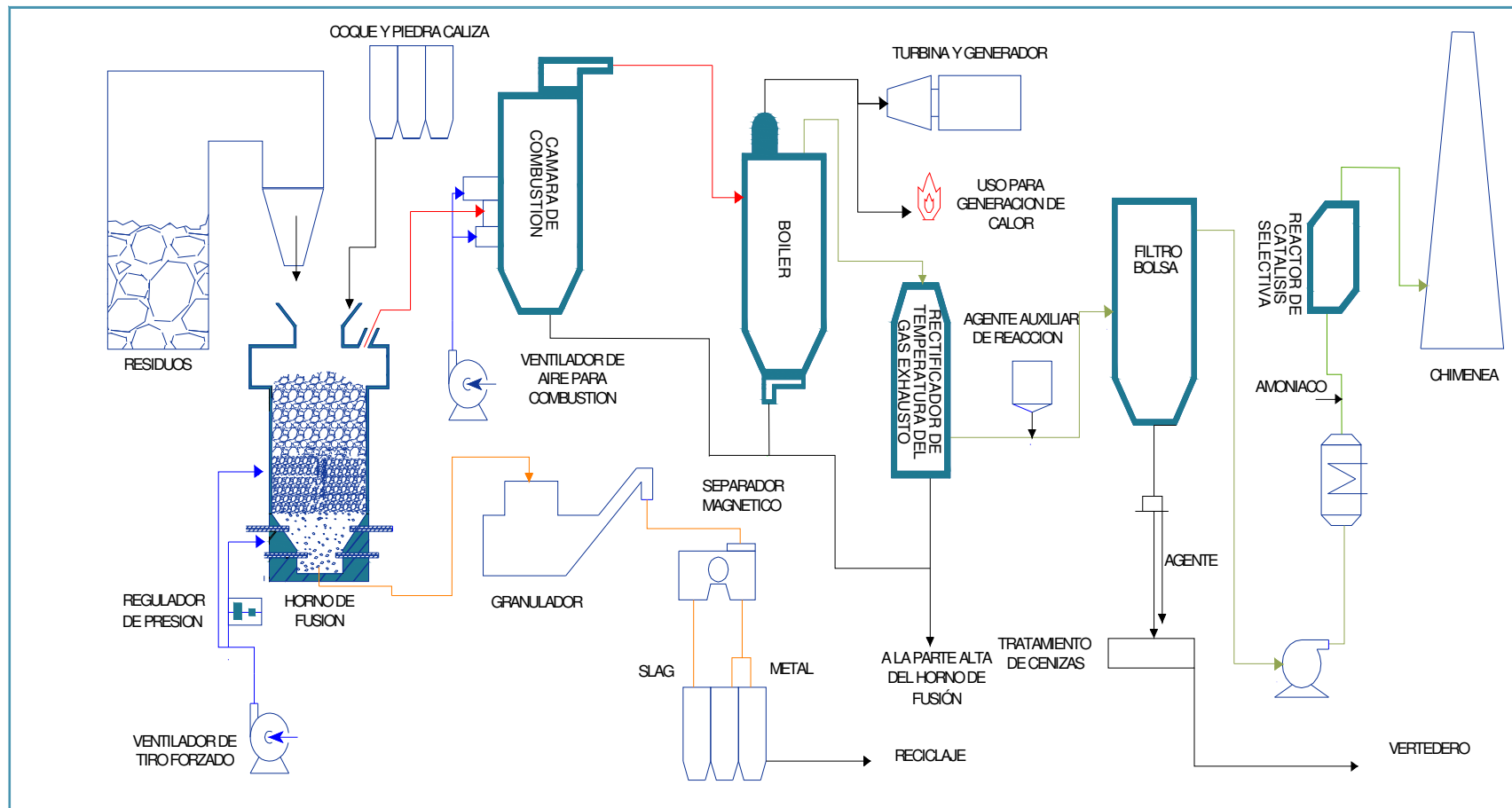
Para llevar a cabo el reciclaje del metal éste se retira del *slag* mediante un separador magnético.

El Sistema de fusión directa tiene las siguientes características:

- a) El sistema ofrece un alto grado de flexibilidad para adaptarse a diferentes tipos de residuos.
- b) Todas las escorias y metal producido en el resultado final de la fusión directa del sistema pueden ser reutilizados de manera efectiva.
- c) La energía como calor recuperado del proceso puede utilizarse eficazmente para la generación de electricidad, la planta de Akita tiene una potencia eléctrica instalada de 8.5 MW
- d) El sistema provee control de las emisiones de gases tóxicos



Figura 20. Esquema del proceso de gasificación de Nippon Steel



Fuente: Modificado de (68)



4.2.2 EBARA. Japón.



EBARA es el desarrollador de distintas tecnologías de gasificación de residuos como son la tecnología TwinRec (Twin Internally revolving Fluidized bed Gasifier), EUP (gasificación de residuos plásticos) y el ICFG (Internally Circulating Fluidized- bed Gasifier)

De acuerdo a la información proporcionada por EBARA en su sitio web, para el 2007 contaba con 11 plantas que utilizan la tecnología TwinRec, toda ubicadas en Japón, de las cuales 7 tratan RSU (69).

Tabla 25. Plantas que tratan residuos sólidos urbanos con la tecnología TwinRec

Nombre de la planta	Año	Capacidad de tratamiento (trenes)x(ton/día)	Poder calorífico inferior (MJ/kg)	Capacidad térmica (MWt)
Sakata Area Clean Unión	Mar 2002	2x98	10.9	2x12.3
Kawaguchi	Nov. 2002	3x140	13.0	3x21
Ciudad Ube	Nov. 2003	3x66	12.5	3x9.5
Unión Chuno	Mar 2003	3x56	11.3	3x7.3
Minami Shinshu	Mar 2003	2x46.5	8.4	2x4.5
Nagareyama	Feb. 2004	3x69	11.7	3x9.3
Ciudad Hino Shiga área central	Abril 2007	3x60	13.0	3x5.2



Como se observa en la tabla 24 de las plantas instaladas con la tecnología TwinRec la que tiene mayor capacidad de tratamiento es la que está ubicada en Kawaguchi.

Las instalaciones de Kawaguchi utilizan el proceso TwinRec (lecho fluidizado en combinación con fusión de cenizas) y reciben los RSU de la ciudad de Kawaguchi y Hatogaya.

La planta tiene una capacidad de 420 toneladas por día de RSU en tres líneas de proceso, más 37 toneladas por día de cenizas de fondos (69) que hacen un gran total de 153,000 toneladas anuales tratadas (70). La energía térmica es recuperada del vapor generado por calderas, obteniendo un máximo de electricidad de 12 MW que cubren el consumo de las instalaciones y de la planta de reciclado. Cada línea genera 25.8 toneladas por hora de vapor a 3.95 MPa y 400 °C. El tratamiento del gas obtenido incluye un filtro bolsa, un scrubber y una destrucción catalítica de los NOx, la altura de la chimenea es de 100 m. (71)

Descripción del proceso

El proceso TwinRec está basado en la gasificación por lecho fluidizado en combinación con fusión de cenizas. Los componentes del sistema TwinRec son: un gasificador de lecho fluidizado y una cámara ciclónica de vitrificado de cenizas. El gasificador de lecho fluidizado tiene dimensiones compactas y opera a temperaturas entre 500 - 600 °C. Junto con el gas combustible resultante de la gasificación se arrastran finas partículas en el flujo de gas que abandona el gasificador. La baja temperatura en el lecho fluidizado permite el fácil control de las condiciones de proceso. La función principal del gasificador es la separación del gas combustible de las partículas metálicas y del material inerte de los residuos. El gas combustible y las partículas de carbón son quemadas en la cámara ciclónica de fusión de cenizas a temperaturas de entre 1,350 a 1,450 °C

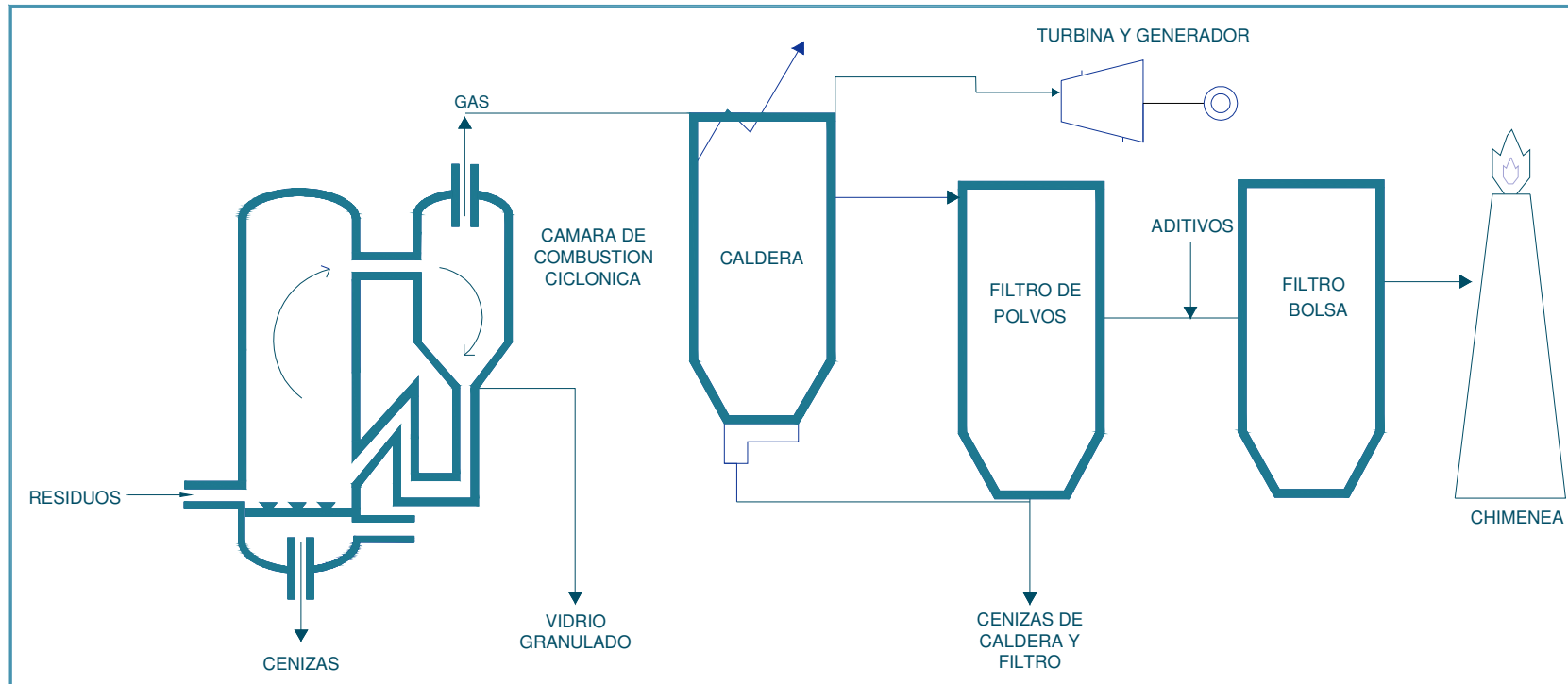


Descripción de trenes de procesos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos

con adición de aire secundario. Aquí las partículas finas son recolectadas en las paredes donde son vitrificadas en un lento proceso a través del horno. La escoria fundida se enfría en un baño de agua para formar un granulado con excelente resistencia a la lixiviación, que reúne todas las normas comunes para su reciclado en la construcción. La elevada temperatura de combustión garantiza que se cumplan las más estrictas normas de emisión de dioxinas a 0.1 ngITEQ/Nm^3 . El gasificador y el horno de fusión de cenizas operan a condiciones atmosféricas sin consumo de combustibles fósiles (excepto para el arranque) (72). El contenido energético de los residuos es convertido en electricidad y/o calefacción con alta eficiencia neta



Figura 21. Esquema del proceso de gasificación TwinRec de EBARA



Fuente: Modificado de (71)



4.3 Gasificación por arco de plasma

4.3.1 Westinghouse. Japón

Alter NRG es la compañía dedicada a comercializar la tecnología de gasificación por plasma desarrollada y patentada por Westinghouse Plasma Corporation (una subsidiaria de propiedad absoluta de Alter NRG) que tiene sede en Madison, Pennsylvania y más de 30 años de experiencia en la aplicación de la gasificación por plasma.

Westinghouse únicamente cuenta con 2 plantas instaladas y que operan comercialmente, tratando residuos sólidos urbanos, ambas se encuentran ubicadas en Japón, una en la ciudad de Utashinai y otra en Mihama- Mikata, de las cuales la primera es la más representativa ya que trata 65,700 ton/año, mientras que la segunda sólo trata 8,000 ton/año

Descripción del proceso



La planta de gasificación de plasma en Utashinai, Japón inició el procesamiento de RSU en 2003. El diseño original de la planta tenía en cuenta una capacidad de alrededor de 170 toneladas diarias de residuos sólidos municipales y residuos de trituradoras de automóviles, pero hoy en día, la planta procesa aproximadamente 280 toneladas por día, de los cuales 2/3 corresponden a mezcla de residuos sólidos urbanos y 1/3 a residuos de trituradoras de autos. Genera 7.9 MWh de electricidad con una turbina de vapor, vendiendo cerca del 55% a la red eléctrica.

El proceso comienza con la llegada de los residuos a la planta, éstos son enviados al reactor de plasma, el cual acepta cualquier tipo de residuos sin



previo tratamiento, sólo es necesario la remoción y trituración de los grandes volúmenes, (mayores a un metro) para posteriormente regresarlos al depósito de almacenamiento de la planta procesadora

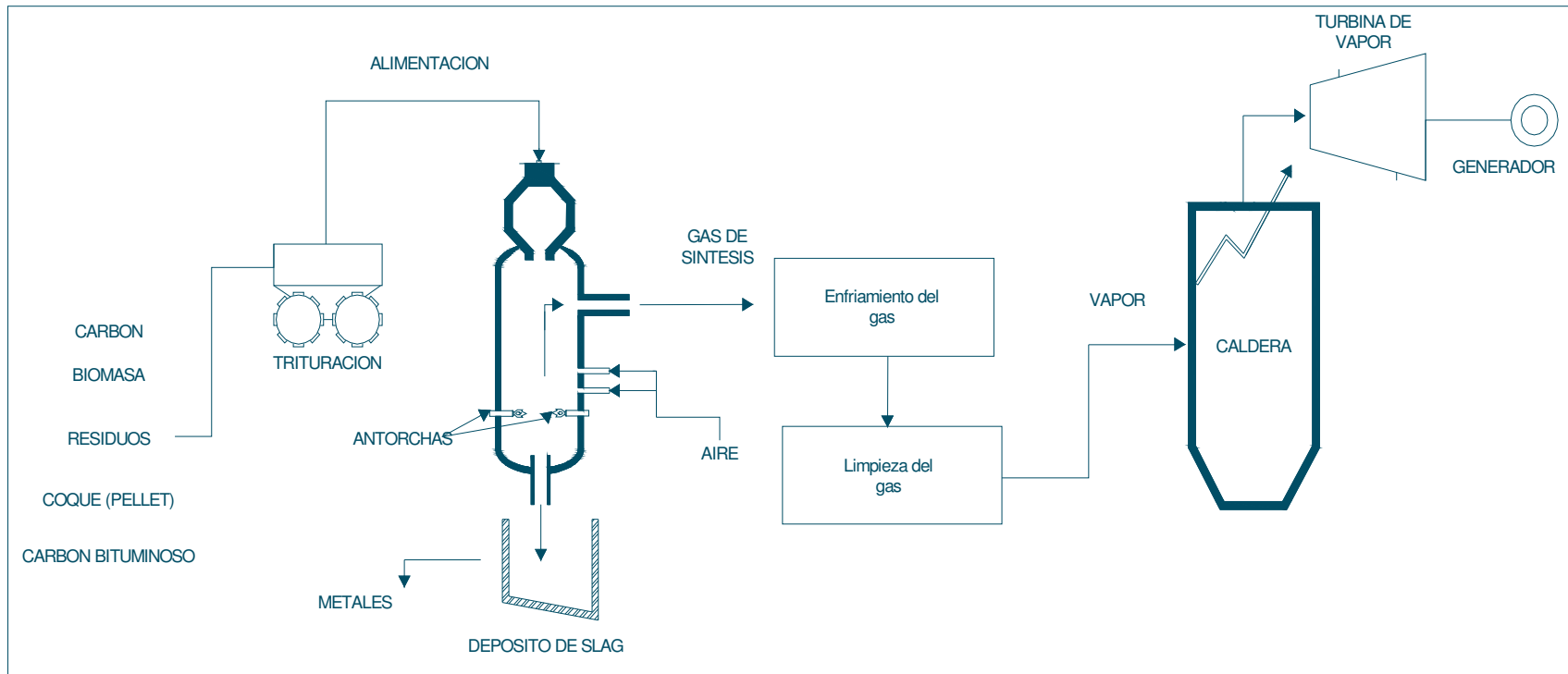
El reactor de plasma es de flujo descendente de lecho móvil y opera a una atmósfera de presión y a temperaturas que van de los 1,500 a los 5,500 °C, a causa de estas altas temperaturas los residuos son completamente destruidos y transformados en sus componentes básicos. El reactor de plasma no discrimina entre diferentes tipos de residuos, la única variable es la cantidad de energía que se requiere para procesarlos.

Los residuos inorgánicos tal como sílice, tierra, concreto, vidrio, gravilla, etc., contenidos en la mezcla de residuos son vitrificados y fluyen por la parte inferior del reactor, no se forman cenizas; por la parte superior del reactor se obtiene gas de síntesis de alto poder calorífico que es pasado por un sistema de enfriamiento para después enviarlo a un sistema de limpieza de gases.

El gas de síntesis es utilizado para generar vapor y éste a su vez para producir energía eléctrica.



Figura 22. Esquema del proceso de gasificación con arco de plasma de Westinghouse



Fuente: Modificado de (73)



4.3.2 *Plasco Energy Group. Ottawa*

Plasco Energy Group es una empresa especializada de Ottawa en el campo de la gasificación por plasma, actualmente es propietaria y operadora de dos instalaciones que tratan RSU, una de capacidad de 85 toneladas por día en Ottawa, Canadá; y otra de cinco toneladas por día en Castellgalí, España. El proceso de gasificación Plasco ha sido desarrollado durante dos décadas con el apoyo científico del Consejo de Investigación Nacional de Canadá, usa generadores de plasma para elevar la temperatura de los residuos que en el reactor va de los 1, 000 a los 8,000 °C, a estas altas temperaturas se logra que los residuos lleguen a átomos simples y se reconstituyan en gases, principalmente monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) e hidrógeno (H₂), que se pueden utilizar para alimentar a los generadores de gas para producir electricidad.

Mediante el proceso se obtienen tres productos que son colectados para su futuro uso:

- Gas de síntesis – usado para generar electricidad.
- Vapor – utilizado para aumentar la eficiencia de la generación de energía.
- Sólidos Inertes reutilizables – puede usarse como aditivo para construir carreteras o para construcciones en general.

La proporción de volumen de residuos sólidos dispuestos en el proceso y los sólidos reutilizables al final del proceso son 250:1.

Las instalaciones de demostración Plasco tienen dos procesos distintos:

1. Una planta de procesamiento de plasma utilizando generadores para convertir los residuos en gas de síntesis con tal calidad que cumpla con las especificaciones de los fabricantes
2. Una central eléctrica que opera en cogeneración utilizando el gas de síntesis y el calor de la transformación para producir electricidad con tal de operar la planta de transformación y para venta en la red.



Descripción de trenes de procesos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos



Las instalaciones en Ottawa, Canadá consisten en una planta piloto de proceso de gasificación para convertir RSU con un poder calorífico de aproximadamente 16,720 kJ/kg y 30% de humedad en un gas de síntesis y *slag* inerte. La planta de evaluación comenzó sus operaciones en el año

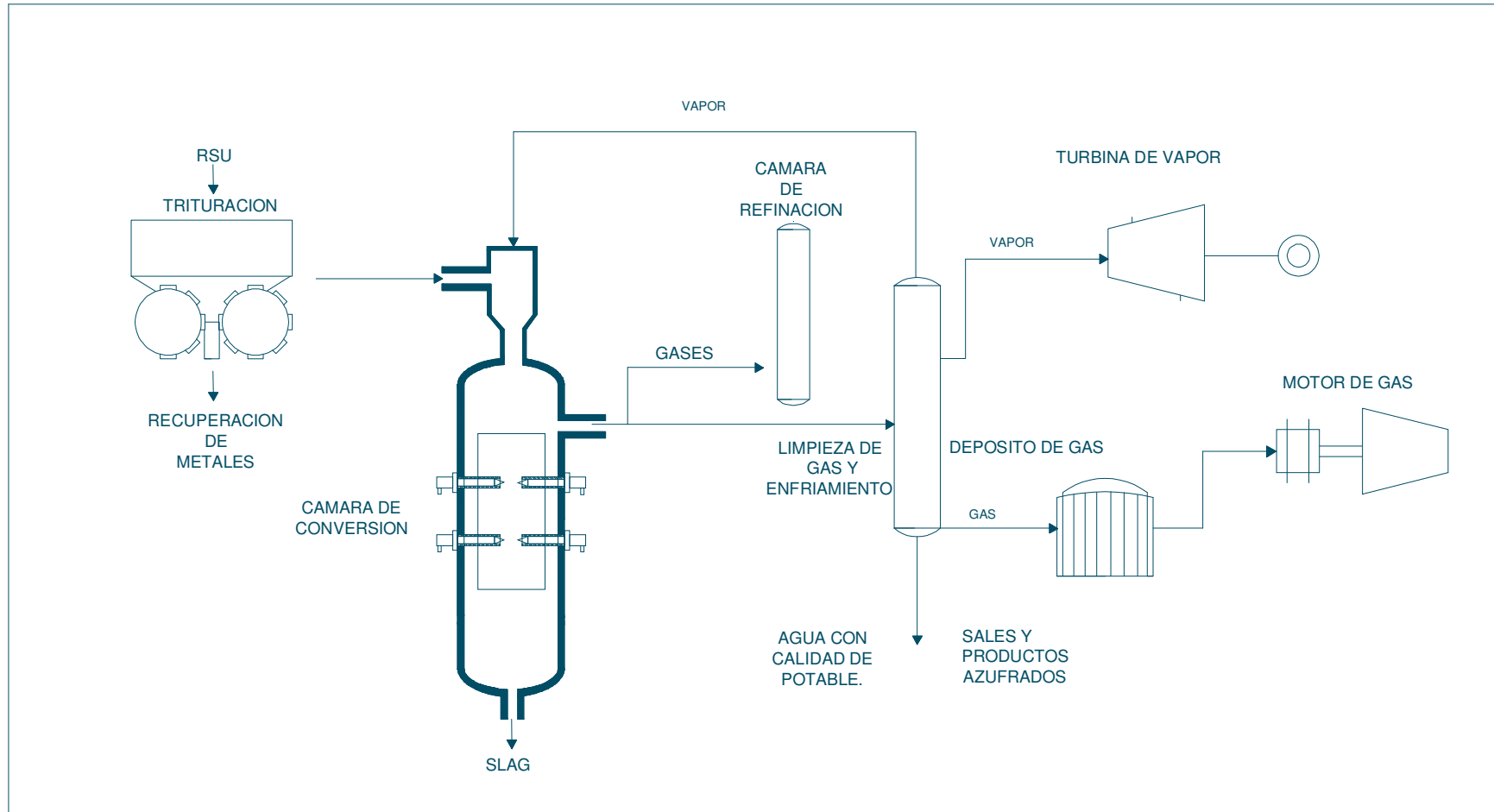
2008 y está diseñada para tratar 85 toneladas al día, aunque en el primer reporte semestral (enero a julio de 2008) el valor máximo de residuos recibidos fue de 56 toneladas en un día.

Produce cerca de 3.3 MW netos de electricidad generados en un motor de gas, para venderlos a la red de Ottawa. (74) Con esta planta piloto se evaluará y demostrará el escalamiento del sistema.

Con la operación exitosa de la planta de Ottawa se logrará que la tecnología sea fácilmente escalable físicamente y en cuestión de costos para acondicionarse a requerimientos mayores.



Figura 23. Esquema del proceso de Gasificación por arco de Plasma de Plasco Energy Group.



Fuente: Modificado de(75)



4.4 Pirólisis

4.4.1 Mitsui Babcock Energy Ltd, Japón.



La empresa Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd (MES), que es filial de Mitsui Babcock Energy Ltd, comercializó por primera vez la tecnología “Mitsui Recycling 21 (R21)”(51).la cual es utilizada para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos en el que la materia carbonosa contenida en los mismos es pirolizada y las cenizas obtenidas son fundidas. Aunque la tecnología básica es licencia de Siemens de Alemania en 1991, MES ha hecho ajustes al diseño original.

La primera planta instalada con este proceso se encuentra en la ciudad de Fukuoka, y recibe el nombre de Yame Seibu Clean Center. La construcción del centro comenzó en el año 1997 y las operaciones en el año 2000.

La capacidad nominal de la planta es de 220 ton/día (76). En dos líneas de proceso, cada una de 110 ton/día. De acuerdo a la última información obtenida de este centro, en el año 2004 seguía operando satisfactoriamente(77).

Actualmente la empresa Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd (MES) ha instalado cinco plantas más con la tecnología R21, en las ciudades de Toyohashi (400 ton/día), Ebetsu (140 ton/día), Koga Seibu (260 ton/día), Nishi Iburi (210 ton/día) y en Kyohoku (160 ton/día) en Japón

Descripción del proceso

El proceso R21 está constituido de las siguientes etapas: recepción de los residuos; trituración y almacenamiento provisional; pirolisis; recuperación de gas y materiales, combustión del gas y el material carbonoso (char); generación de



energía eléctrica seguido de limpieza del gas obtenido. Con dos líneas de operación que sólo comparten el bunker de entrada, la chimenea y la turbina de vapor.

La planta R21 está diseñada para tratar residuos sólidos de casa – habitación y de comercios con un poder calorífico de 4,200 a 10,000 kJ/kg (78), se requiere una separación manual que incluya la recuperación de residuos de gran tamaño. Los residuos que salen de esta separación van a una trituradora y se almacenan. En seguida los desechos se recuperan por medio de una grúa y se introducen en una unidad de trituración biaxial. Esta trituradora reduce los residuos a un tamaño máximo de 200 mm. La trituradora se alimenta por medio de una banda transportadora a la entrada de una tolva, la cual alimenta el reactor de pirólisis(79). En el reactor de pirólisis los residuos son sometidos a secado y pirólisis de baja temperatura(alrededor de 450°C),sin adición de oxígeno, en un reactor de tambor rotatorio el cual es calentado indirectamente pasando una corriente de aire caliente a través de un intercambiador de calor que se encuentra a lo largo del tambor. El tiempo de residencia es de una hora. Del proceso se obtiene: gas de síntesis compuesto principalmente por metano, hidrógeno e hidrocarburos; y residuos sólidos.

Los residuos obtenidos en el proceso de pirólisis son separados del gas de síntesis obtenido, se enfrían y se hacen pasar por un sistema de separación de metales, en el que se recuperan los ferrosos y no ferrosos para ser reciclados. Los residuos sólidos remanentes (residuos carbonosos y material inerte) son pulverizados a un tamaño máximo de 1 mm y por medio de transportadoras neumáticas se introducen en la cámara de combustión y se mezclan con el gas de síntesis, esta cámara de combustión se encuentra a una temperatura de aproximadamente 1,300°C (79) y se encuentra a bajos niveles de exceso de aire, minimizando la formación de dioxinas y gases contaminantes como el NOx . Por otra parte a estas altas temperaturas las cenizas son vitrificadas y posteriormente se pueden utilizar en la construcción.



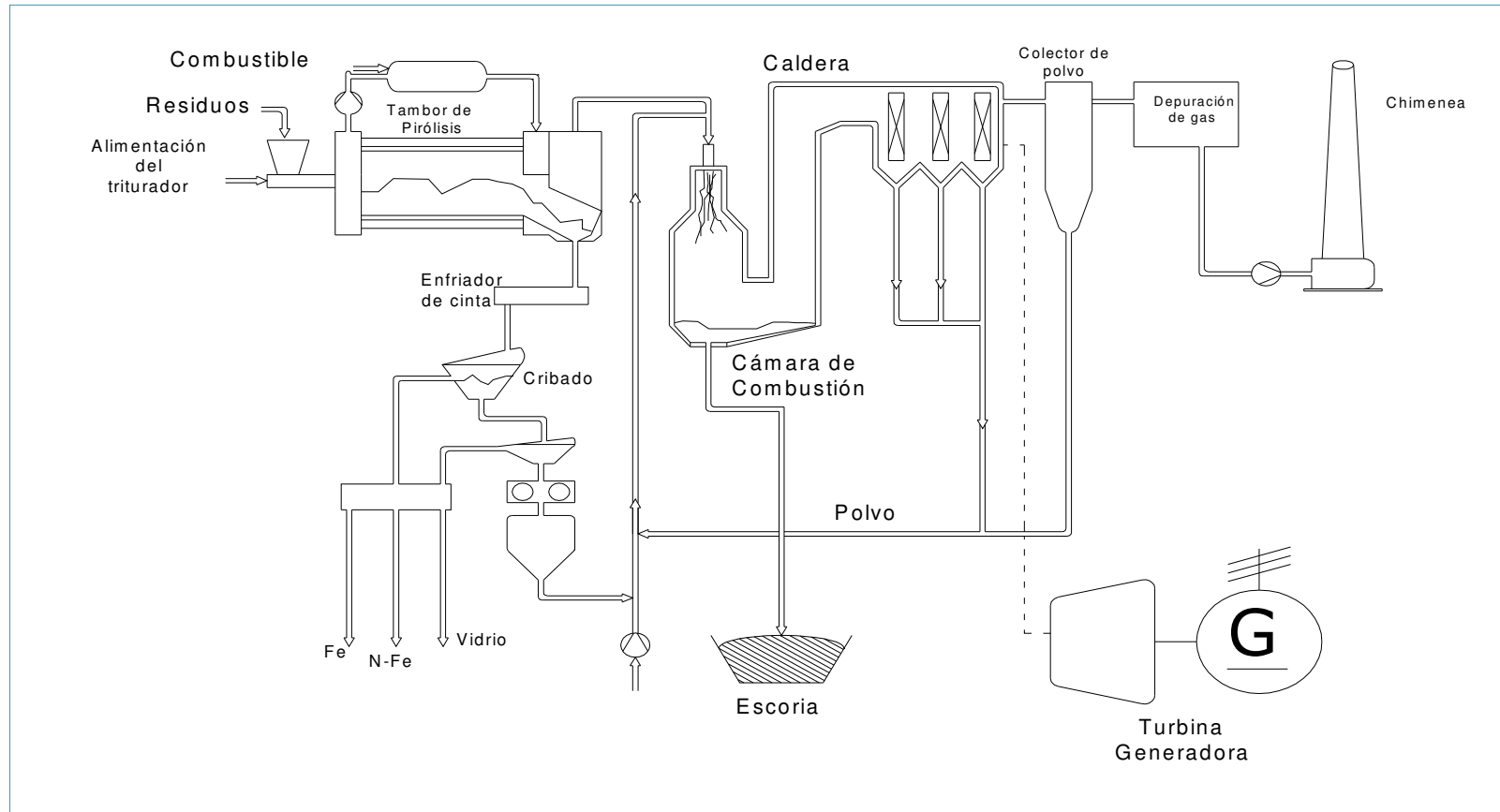
Descripción de trenes de procesos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos

Los gases obtenidos del horno de combustión son utilizados para calentar el aire que se utiliza para el calentamiento indirecto del reactor de pirólisis. El aire caliente es circulado en un ciclo cerrado mediante un soplador. La caldera de recuperación de calor residual genera vapor con temperatura de 400 °C y una presión de 40 bar que se utilizan para alimentar a un turbogenerador.

Los gases de combustión son limpiados mediante dos series de filtros bolsa , la primera serie de filtros bolsa es utilizada para coleccionar las cenizas volantes y las cenizas de caldera que son recicladas en la cámara de combustión, evitando enviar cenizas volantes a un sitio de disposición final. La otra serie de filtros bolsa está equipada con un sistema de inyección de piedra caliza para abatir la emisión de gas ácido.(80) Los residuos sólidos obtenidos de este proceso son enviados a un sitio de disposición final de residuos peligrosos y los gases son enviados a una chimenea. En la Figura 24 se esquematiza el proceso antes descrito.



Figura 24. Esquema del proceso de la tecnología *Mitsui Recycling 21* (Licencia de *Siemens*)



Fuente: Modificado de (76)



4.4.2 WasteGen UK /TechTrade , Alemania.



WasteGen UK es el comercializador de la tecnología de tratamiento de residuos sólidos urbanos mediante pirólisis en horno rotatorio, ofrecida por TechTrade. Esta tecnología ha sido utilizada exitosamente en la planta *Müllpyrolyseanlage* que se encuentra ubicada a 3 km de la ciudad de Burgau, Alemania y da servicio al condado de Günzburg; en la planta se tratan y valorizan residuos municipales, de comercios, voluminosos y los lodos de plantas de tratamiento de aguas.

Recibe al año 34,000 toneladas de residuos de una población aproximada de 120,000 habitantes. La planta inició su operación en 1987 y actualmente está trabajando a capacidad total. (81)

Descripción del proceso

El proceso comienza con la llegada de los camiones recolectores que descargan la basura dentro del bunker que tiene una capacidad de almacenamiento de algunas semanas, después los residuos son levantados mediante un gancho y depositados en la alimentación de una trituradora. Existen 2 triturados de 33 ton/h (una operando y otra en *stand by*) la trituradora fragmenta los residuos para obtener un tamaño de partícula máximo de 30 cm. Los residuos triturados son dejados dentro del área de almacenamiento en donde un gancho mecánico es utilizado para depositarlos en la tolva de alimentación del horno de pirólisis, aquí un alimentador de tornillo introduce los residuos al horno, de esta forma se mantiene una alimentación constante y un ambiente libre de oxígeno. Los residuos entran a los dos hornos rotatorios de pirólisis, cada uno de 2.64 ton/h, los cuales giran a 1.5 rpm, cada reactor mide 2.2 m de diámetro por 22 m de largo, con un espesor de 2.54 cm y el material de construcción es AC66 (81)



El horno de acero rota dentro de una chaqueta en chapa de metal. Parte de los gases calientes de la cámara de combustión (a temperatura de aproximadamente 1,260 °C) fluyen dentro de la parte enchaquetada del horno. De esta forma las paredes externas del horno son calentadas indirectamente por los gases calientes del horno de combustión. La parte externa del horno alcanza una temperatura de 700 °C y dentro del horno la temperatura es aproximadamente de 500 °C. El tiempo de residencia dentro del horno es de 1 h.

Los sólidos generados en el horno (*char*, minerales y vidrio) son descargados a un baño de agua. El *char* y las cenizas son removidas y se envían a una banda transportadora para ser vertidos como materia inerte (óxido de aluminio, de calcio y hierro; carbón, sulfatos, carbonatos) al relleno sanitario del condado, la cantidad vertida corresponde al 3 % aproximadamente de cada tonelada de residuos alimentada.

El material férrico contenido en los residuos se extrae mediante un separador magnético y es enviado a almacenamiento en el sitio para la recolección por parte de los usuarios (81).

El gas de pirólisis contiene entre un 40 a 60% de vapor y aproximadamente 15 % de productos orgánicos de condensación (alquitrán y aceite)

El *syngas* caliente y sucio es pasado a través de un ciclón en el cual se remueven partículas que son descargadas en una cinta transportadora para su disposición en el relleno sanitario

La cámara de combustión quema el *syngas* junto con el gas del relleno sanitario a temperaturas mayores de los 1,250 °C

Comúnmente el 80% de los gases de combustión calientes son llevados a la caldera, mientras que el 20% restante junto con los flujos de retorno del horno de pirólisis proveen un calentamiento indirecto para llevar a cabo la pirólisis.

Los gases de combustión pasan a través de filtros bolsa para remover los remanentes de partículas, se agrega al flujo de gases de combustión bicarbonato



Descripción de trenes de procesos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos

de sodio y carbón activado para absorber los contaminantes gaseoso (SO_2 y HCl) y mercurio.

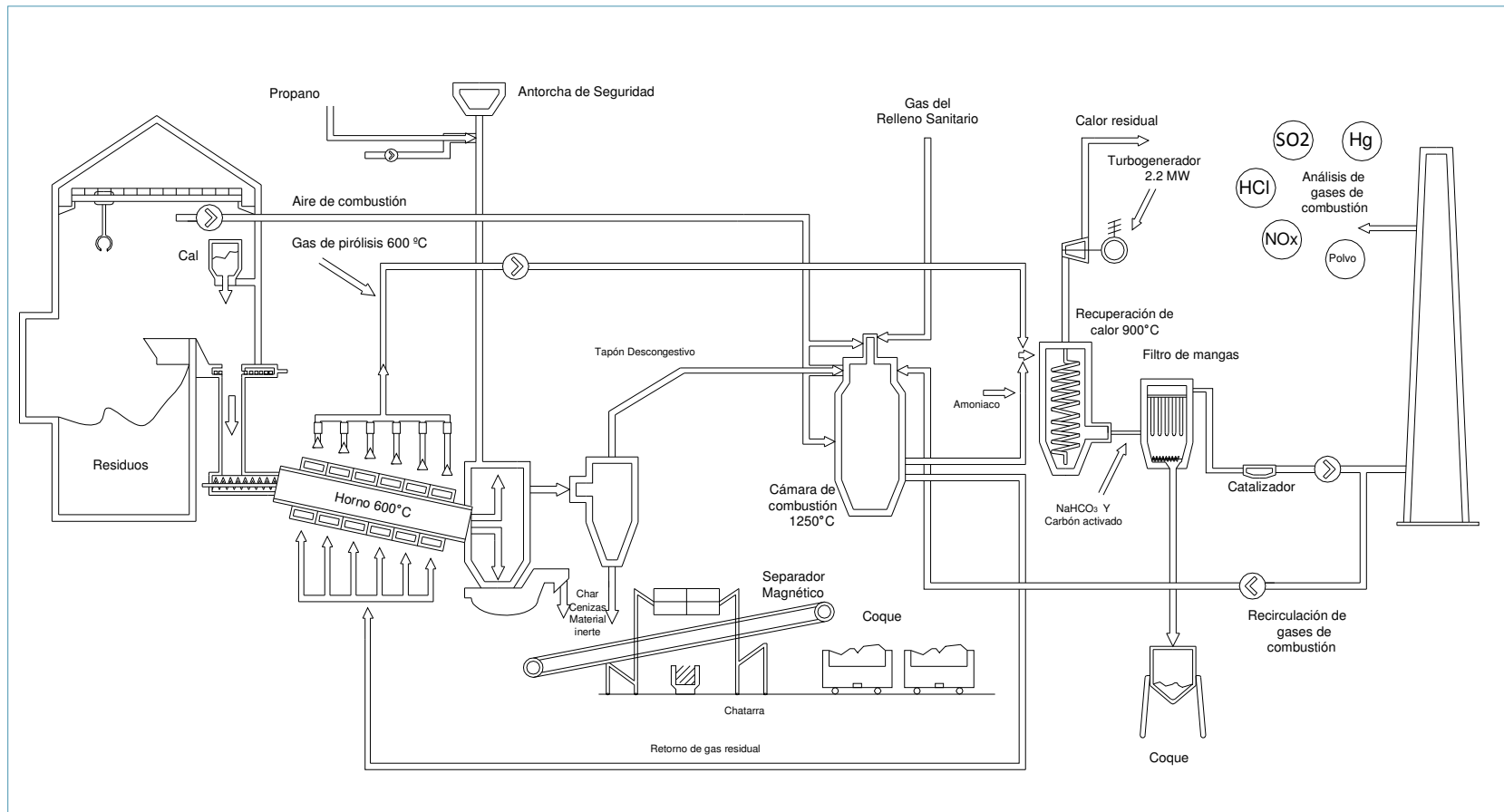
Los gases de combustión son descargados a través de una chimenea de 28.3 m.

El vapor es generado en una caldera e impulsa a una turbina de vapor de 2.2 MW para generación de energía eléctrica. El vapor residual se condensa y es enviado a un invernadero cercano.

Se genera aproximadamente 701 m^3 por cada tonelada de RSU alimentado y su poder calorífico se encuentra entre los $9,990 \text{ kJ/m}^3$ a los $14,000 \text{ kJ/m}^3$ dependiendo de la calidad de la alimentación.



Figura 25. Esquema del proceso de pirólisis de la planta Müllpyrolyseanlage



Fuente: Modificado de (82)



Tabla 26. Tabla comparativa de información técnica y económica de los diferentes trenes de proceso presentados

Rubro	INCINERACIÓN		GASIFICACIÓN		GASIFICACIÓN POR ARCO DE PLASMA		PIRÓLISIS	
	TIRMADRID	Ivry París XIII	Nippon Steel	EBARA	Westinghouse Plasma Corporation	Plasco Energy Group	Mitsui Babcock Energy LTD	WasteGen UK/ TechTrade
Ubicación	España	Francia	Japón	Japón	Japón	Canadá	Japón	Alemania
Año de inicio de operaciones	1996	Instalada en 1969 remodelada en 1997	2002	2002	2003	2008	2000	1987
Tecnología	Horno de lecho fluidizado burbujeante	Horno de rejilla Proveedor CNIM, Martin	Direct Melting System (Sistema de Fusión directa)	Gasificación de lecho fluidizado y vitrificación de cenizas	Gasificación por arco de plasma	Gasificación por arco de plasma	Horno rotatorio de pirólisis	Horno rotatorio de pirólisis
Tipo de residuos que son tratados	Fracción de rechazo de RSU	RSU	RSU, incombustibles lodos, residuos de incineradoras	RSU, y cenizas de plantas incineradoras	Mezcla de residuos sólidos urbanos (2/3) y residuos de trituradoras de autos (1/3)	RSU	RSU y de comercios	RSU y lodos de plantas de tratamiento de aguas
Poder calorífico medio de la alimentación (kJ/kg)	ND	8,370	ND	13,012	ND	16,720	7,100	8,368
Capacidad nominal (ton/día)	660	3,000	440	420	280	85	220	128
Temperatura en el reactor de conversión térmica (°C)	910	900	400-1,000	500-1,450	1,500-5,500	1,000-8,000	450	500



Descripción de trenes de procesos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos

Rubro	INCINERACIÓN		GASIFICACIÓN		GASIFICACIÓN POR ARCO DE PLASMA		PIRÓLISIS	
	TIRMADRID	Ivry París XIII	Nippon Steel	EBARA	Westinghouse Plasma Corporation	Plasco Energy Group	Mitsui Babcock Energy LTD	WasteGen UK/ TechTrade
Pre tratamiento	1), 2),3) y 4)	4)	5)	5)	5)	4) y 5)	4) y 5)	5)
Tratamiento posterior	6), 7), 8) y 9)	6),7) y 8)	10) y 12)	14) y 13)	NE	NE	14) y otros NE	11), 14), 13) y 8)
Productos principales del proceso	Energía eléctrica Materiales reciclables	Energía eléctrica Vapor	Energía eléctrica Slag	Energía eléctrica Slag	Energía eléctrica Slag	Energía eléctrica Slag, metales	Energía eléctrica Slag, material carbonizado	Energía eléctrica
Potencia eléctrica instalada (MW)	29	63	8.5	12	7.9	3.75	5.1	2
Autoconsumo de energía eléctrica (%)	30	ND	ND	ND	45	ND	ND	ND
Tipo de generador de potencia eléctrica	Turbina de vapor	Turbina de vapor	Turbina de vapor	Turbina de vapor	Turbina de vapor	Motor de combustión interna	Turbina de vapor	Turbina de vapor
Servicios requeridos	Combustible extra para mantener el lecho a una temperatura mayor de 850°C y para arranque de horno.	ND	Agua Aire Coque Amoniaco CaO	Aire Agua	Gas natural Agua Electricidad	ND	Agua Aire Combustible Energía eléctrica	ND
Costos de inversión (USD)	182,509,771	1,393,365,600	230,035,389	102,412,48 ₂	84,564,677	26,876,665	103,034,000	30,522,710
Costos de operación y mantenimiento anuales (USD)	19,711,055	105,294,600	19,698,433	14,656,31 ₉	7,155,473	ND	3,135,967	ND



Descripción de trenes de procesos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos

Rubro	INCINERACIÓN		GASIFICACIÓN		GASIFICACIÓN POR ARCO DE PLASMA		PIRÓLISIS	
	TIRMADRID	Ivry París XIII	Nippon Steel	EBARA	Westinghouse Plasma Corporation	Plasco Energy Group	Mitsui Babcock Energy LTD	WasteGen UK/ TechTrade
Costos de operación por MWh producido (USD/MWh)	106	ND	362	190	113	ND	77	ND
Generación de energía por tonelada tratada (MWh/ton)	0.84	0.08	0.37	0.55	0.54	1.29	0.45	0.33
^{a)} Eficiencia en la conversión (%)	27.7 ^{b)}	4.7	12.2 ^{b)}	20.2	17.8 ^{b)}	36.9	14.6	18.9
Costos de inversión por tonelada tratada (USD/ton)	830	1,393	1,568	732	906	1,440	1,200	715
Costos de operación y mantenimiento por tonelada tratada (USD/ton)	90	105	134	100	77	50	43	110
Referencias	Elaboración a partir de (83), (84), (85), (86) y (87).	Elaboración a partir de (85), (88), (63) y (89)	Elaboración a partir de (68) y (90)	Elaboración a partir de (91) y (69)	Elaboración a partir de (92)	Elaboración a partir de (93) y (94)	Elaboración a partir de (51), (95), (80) y (96)	Elaboración a partir de (51), (81), (97) y (98)

ND: No disponible ND:No disponible

^{a)} Se obtuvo dividiendo la cantidad de energía eléctrica generada entre la energía contenida en la alimentación

^{b)} Estos valores fueron calculados con una estimación de poder calorífico de 14,644 kJ/kg de los residuos alimentados.

Pre tratamiento:

- 1) Selección manual de fracciones recuperables.
- 2) Cribado
- 3) Recuperación de materiales férricos manualmente
- 4) Recuperación de materiales férricos automáticamente
- 5) Remoción de grandes volúmenes

Tratamiento posterior

- 6) Ciclón
- 7) Reactor semihúmedo ,
- 8) Carbón activado
- 9) Filtro de mangas
- 10) Filtro bolsa
- 11) Enfriamiento del gas
- 12) Reactor catalítico
- 13) Filtro bolsa con adición de reactivos
- 14) Separador de polvos



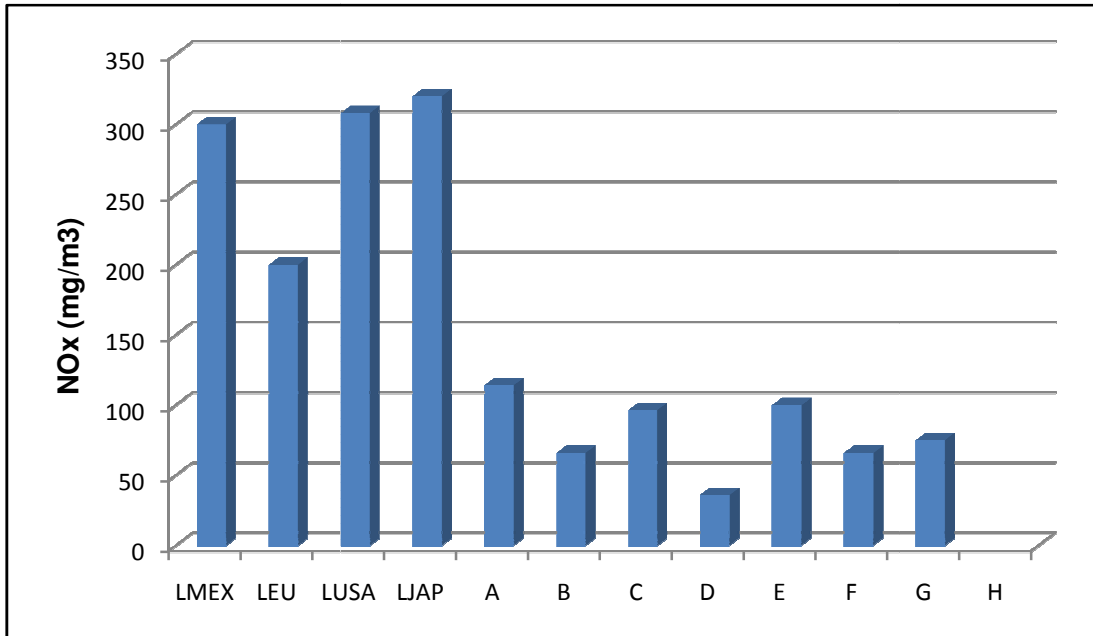
A continuación se muestran las emisiones atmosféricas de las tecnologías y se comparan con los límites nacionales e internacionales.

En México los límites de emisiones a la atmósfera están expresados en la NOM-098-SEMARNAT-2002 (Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes); los límites en Estados Unidos de América están dados por la EPA; para la Unión Europea se encuentran en la DIRECTIVA 2000/76/CE relativa a la incineración de residuos y en Japón las emisiones están reguladas por la Ley de Control de Contaminación Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente.

LMEX	Límites permitidos por la legislación mexicana
LEU	Límites permitidos por la legislación europea
LUSA	Límites permitidos por la legislación de Estados Unidos
LJAP	Límites permitidos por la legislación Japonesa
A	TIRMADRID
B	Ivry París XIII
C	Nippon Steel
D	EBARA
E	Westinghouse Plasma Corporation
F	Plasco Energy Group
G	Mitsui Babcock Energy LTD
H	WasteGen UK Ltd, Con tecnología diseñada por TechTrade

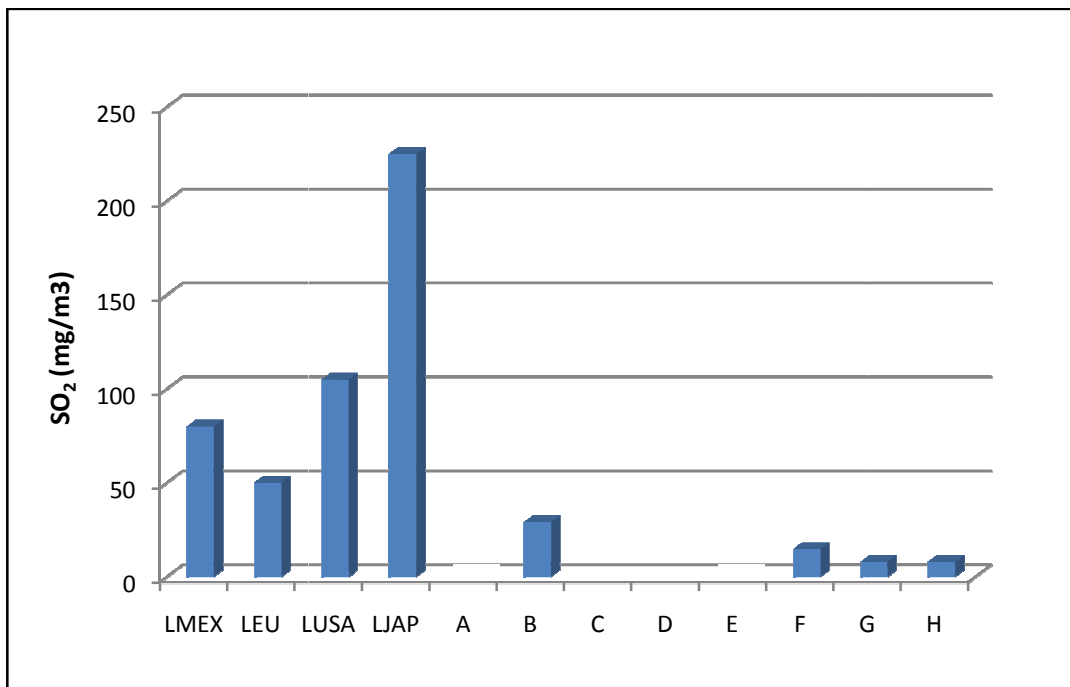


Gráfico 16. Comparación de emisiones de NO_x de las diferentes tecnologías



Fuente: Elaboración propia

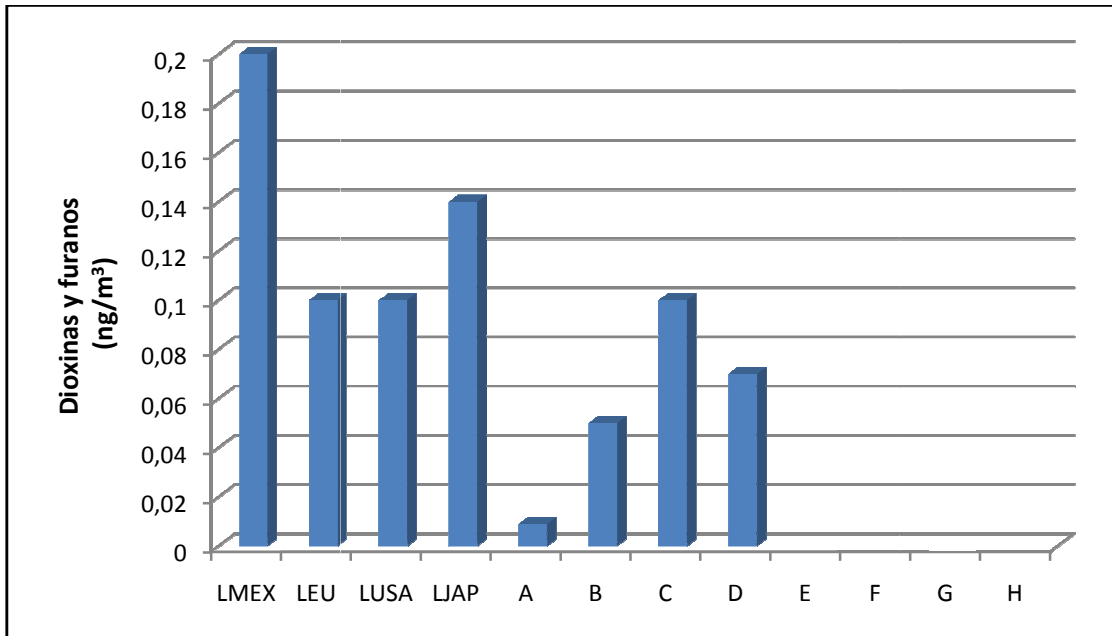
Gráfico 17. Comparación de emisiones de SO₂ de las diferentes tecnologías



Fuente: Elaboración propia

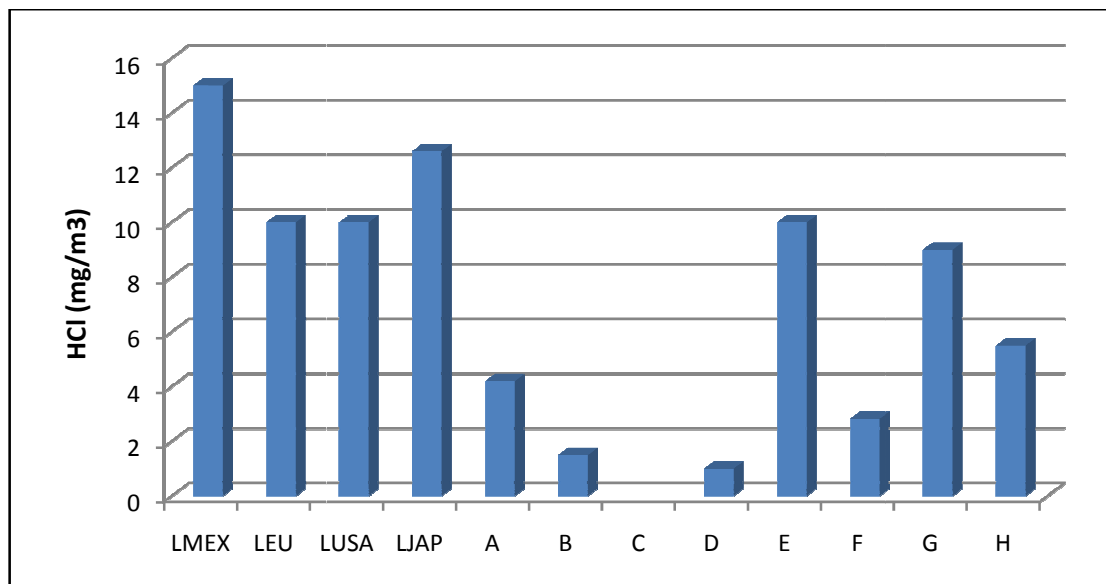


Gráfico 18. Comparación de emisiones de Dioxinas y furanos de las diferentes tecnologías



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 19. Comparación de emisiones de HCl de las diferentes tecnologías



Fuente: Elaboración propia



Como se observa en el Gráfico 16, Gráfico 17, Gráfico 18 y Gráfico 19 las emisiones atmosféricas de las tecnologías de conversión térmica mostradas cumplen con la legislación tanto nacional como internacional, al mantenerse por debajo de los niveles permitidos por cada una, aunque se observa que las emisiones reportadas para contaminantes como los NO_x y el SO₂ son más altas en las plantas de incineración que en las de gasificación o pirólisis.

4.5 Conclusiones del capítulo

Las tecnologías de tratamiento térmico se han desarrollado principalmente en Japón y Europa, en donde existe una mayor experiencia en el manejo de los residuos sólidos urbanos, y en donde este sistema de tratamiento se encuentra dentro de un manejo integral de los residuos.

El presente capítulo mostró la aplicación de 8 diferentes tecnologías de tratamiento térmico de RSU, en general, estas tecnologías están compuestas por las siguientes etapas:

- Recepción de los residuos
- Acondicionamiento de los residuos
- Etapa de conversión térmica
- Recuperación de energía
- Limpieza de gases

La etapa de acondicionamiento de los residuos consiste fundamentalmente en realizar una segregación de los mismos con el objetivo de recuperar los metales y remover los grandes volúmenes.

En la etapa de recuperación de energía, la forma más usual es la generación de vapor para producción de energía eléctrica alimentando a una turbina. Por lo cual la eficiencia de conversión de la energía contenida en los residuos a energía eléctrica es baja, en cambio para la planta que utiliza motor de combustión interna se obtiene la mayor conversión con un 36.9 %.



Descripción de trenes de procesos de conversión térmica de residuos sólidos urbanos

Los costos tanto de inversión (entre 732 a 1,500 USD por cada tonelada instalada) como de operación y mantenimiento (oscilando entre los 43 USD por tratada a los 134 USD/ton tratada) de las tecnologías de tratamiento térmico son muy altos, comparados con los costos de la tecnología de relleno sanitario, que es la utilizada en Latinoamérica, que no supera los 100 USD por tonelada dispuesta.

Debido principalmente a la experiencia en la aplicación de la incineración esta tecnología es la que tiene una mayor capacidad instalada, mientras que la tecnología de gasificación por arco de plasma es la que tiene menor capacidad instalada.



5. Evaluación de tecnologías de conversión térmica

En el capítulo 1 de este documento se mostró la necesidad que el Distrito Federal tiene de solucionar el problema de disposición final de sus residuos sólidos urbanos, ante el inminente cierre del único sitio de disposición final con el que cuenta. A falta de sitios adecuados para la construcción de un nuevo relleno sanitario dentro de la ciudad es necesario proponer alternativas a la forma actual de la gestión de los residuos.

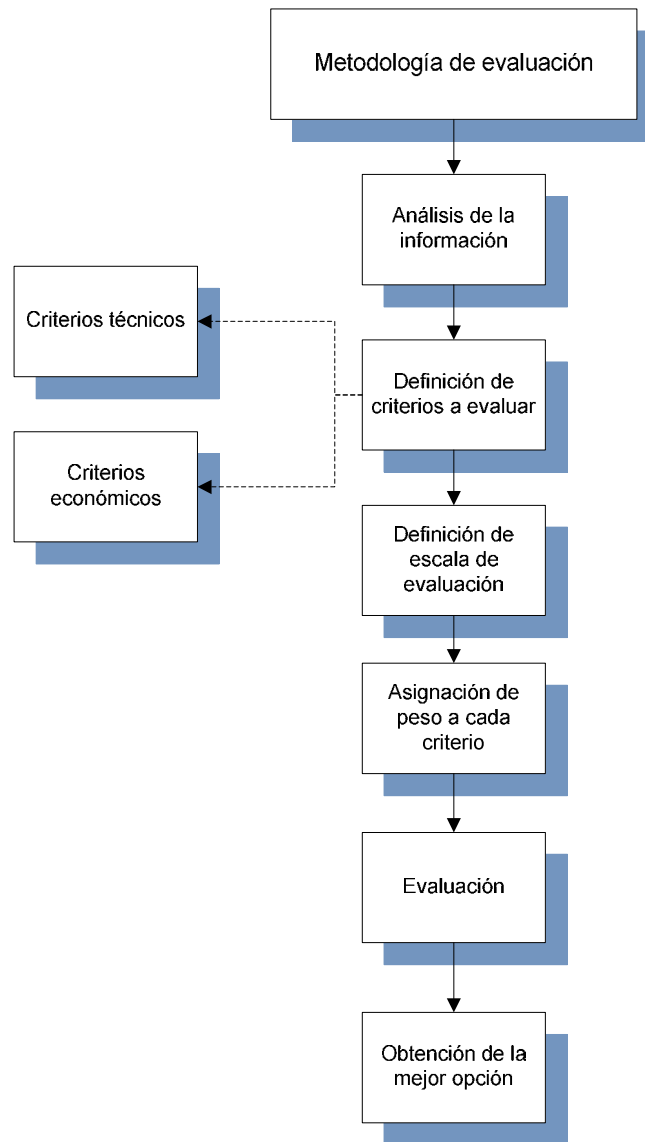
Es por lo anterior que se ha propuesto la valorización de los RSU del Distrito Federal mediante tratamiento térmico tomando como premisa que el PCI de los mismos es superior al mínimo recomendado para un tratamiento de este tipo. De acuerdo con esto se han mostrado las diferentes tecnologías de tratamiento térmico para los RSU, con lo que se pudo observar que cada una tiene diversos atributos, por lo cual surge la necesidad de compararlas.

Es por ello que en este capítulo se llevará a cabo una evaluación de la incineración, la gasificación convencional, la gasificación por arco de plasma y de la pirólisis para discernir cuál de ellos presenta los mejores atributos tanto técnicos como económicos para el problema planteado.

A continuación se presentan la metodología propuesta para llevar a cabo la evaluación de las tecnologías.



Figura 26. Metodología propuesta para la evaluación de las tecnologías



De acuerdo con la metodología propuesta, el primer paso es el análisis de la información existente, con el objetivo de identificar las variables que pueden ser evaluadas. En la Tabla 27 se hace una comparación de las diferentes variables que identifican a las distintas tecnologías de conversión térmica para los RSU.



Tabla 27. Comparación de las distintas tecnologías de conversión térmica

Variable / Proceso	Incineración	Gasificación convencional	Gasificación por arco de plasma	Pirólisis
Temperatura de reacción (°C)	800-1,200	900-1,400	5,000-10,000	250-900
Relación estequiométrica Oxígeno/Carbono	>1	<1	<1	0
Atmósfera de reacción	Aire	Agente gasificante: Aire, Aire enriquecido con O ₂ , vapor de agua	Nitrógeno o argón	Inerte/nitrógeno
Principales productos del proceso				
Fase gaseosa	CO ₂ , H ₂ O, NO _x , SO _x ,	CO ₂ , CO, H ₂ , CH ₄ y H ₂ O,	CO ₂ , CO, H ₂ , CH ₄ y N ₂	H ₂ , CO, hidrocarburos, H ₂ O, N ₂
Fase sólida	Cenizas e inquemados	Slag y cenizas	Slag	Cenizas y carbón
Fase líquida	--	--	---	Aceites de pirólisis
Intervalo de operación típica (ton/día)	36-200	250-500	Hasta 220	10-100
Productos finales	Electricidad y / o vapor	Electricidad, combustibles, productos químicos, vapor	Electricidad, combustibles, productos químicos, vapor	Electricidad, combustibles, productos químicos, vapor
Cantidad de electricidad producida (kWh/ton)	En promedio 605	Mayor a 1,100	Mayor a 1,100	Aprox. 770
Subproductos	Cenizas de fondo que requieren disposición en relleno normalmente del 15 al 30 %	Cenizas de fondo o slag, que requiere disposición final (15-20%) El slag puede tener valor comercial	Cenizas de fondo o slag, que requiere disposición final (15-20%)	Cenizas, char, que requiere disposición en relleno sanitario (15-20%)
Instalaciones existentes	Más de 500 alrededor del mundo, mas de 100 en América	Más de 50 alrededor del mundo. Ninguna en América	Menos de 5 alrededor del mundo. Ninguna en América	Menos de 20 alrededor del mundo, algunas en operación por más de 25 años. Ninguna en América
Costos de inversión por tonelada tratada (USD/ton)	300-500	600-800	Mayor a 800	Aprox. 500
Costos de operación y mantenimiento (USD/ton)	50 a 70	70 a 115	Aprox. 80	50 a 115

Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias (99), (51), (37)(68) (69), (44) (92)



5.1 Definición de los criterios de decisión.

Como segundo paso de la metodología propuesta se deben definir los criterios a evaluar. A partir de la información de la Tabla 27 se seleccionan criterios que servirán para la toma de decisión y se describen en la Tabla 28.

Tabla 28. Descripción de los criterios

Criterios	Descripción
Temperatura de reacción (°C)	La temperatura de reacción es una variable que influye en la conversión de los residuos. A diferentes temperaturas se obtendrán diferentes productos del proceso.
Calidad del producto gaseosos del proceso	La calidad de los gases resultado del proceso, está relacionado con el contenido de fracciones como el hidrógeno y el metano, que favorece su uso como combustible para la generación de energía eléctrica.
Capacidad de tratamiento (ton/día)	Toneladas al día de residuos que puede procesar un módulo de tratamiento térmico.
Rechazos %	Cantidad de materia resultado del proceso que tiene que ser dispuesta en vertedero.
Emisiones a la atmósfera	Compuestos nocivos a la salud que son emitidos por el proceso.
Instalaciones existentes	Este es un indicador del estado de la tecnología y corresponde al número de plantas que existen aplicando el proceso.
Producción bruta de electricidad kWh/ton	Cantidad de energía neta producida por tonelada de residuo alimentado al proceso, que no incluye el uso interno de electricidad
Costos de inversión (USD/ton)	Gastos que se generan por la adquisición, construcción y renovación de los activos fijos tales como terrenos, edificios y equipo pesado.
Costos de operación y mantenimiento (USD/ton)	Los costos de operación y mantenimiento son los costos eficientes de explotación necesarios para la prestación de los servicios básicos y que no forman parte del capital de inversión.



5.2 Definición de la escala de evaluación

Como siguiente paso, de la metodología se ha seleccionado una escala de 0 a 2 para la evaluación cuantitativa de cada criterio. En la Tabla 29 se muestran los intervalos para llevar a cabo la evaluación de cada criterio.

Tabla 29. Intervalos de los criterios para llevar a cabo la evaluación

Criterio	Intervalo	Ponderación	Descripción
Temperatura de reacción (°C)	< a 800	0	Se favorece la generación de dioxinas y furanos. En los procesos donde se genera gas de síntesis éste tiene un bajo poder calorífico debido a la concentración baja de metano. Existe arrastre de partículas sin carbonizar.
	800-1,400	2	A estas temperaturas se favorece la generación de la fase gaseosa que resulta en una mayor cantidad de gases combustibles, o gas de síntesis, según sea el proceso.
	Mayor a 1,400	1	La materia en su mayoría pasa al estado gaseoso, los materiales del equipo deben ser especiales para soportar las altas temperaturas.
Calidad del producto gaseoso	Baja	0	Bajo contenido de fracciones como metano e hidrógeno. (Menor al 10%)
	Media	1	Contenido medio de fracciones como metano e hidrógeno. (Del 10 al 60 %)
	Alta	2	Alto contenido de fracciones como metano e hidrógeno. (Mayor al 60%)
Capacidad de tratamiento (ton/día)	<100	0	Difícilmente escalable
	100-300	1	Medianamente escalable
	≥300	2	Mayormente escalable
Rechazos %	>20	0	Implica mayores costos por concepto de disposición de éstos



Criterio	Intervalo	Ponderación	Descripción
	10-20	1	Implica costos intermedios por concepto de disposición de éstos
	<10	2	Implica menores costos por concepto de disposición de éstos
Emisiones a la atmósfera	Alta	0	Emisiones por arriba de lo estipulado en la normatividad (EPA)
	Media	1	Emisiones dentro de los niveles marcados por la normatividad (EPA)
	Baja	2	Emisiones por debajo de la normatividad (EPA)
Instalaciones existentes	<50	0	Tecnología que aun no ha sido completamente probada
	50-100	1	Tecnología medianamente probada
	> 100	2	Tecnología ampliamente probada
Producción bruta de electricidad kWh/ton	0-500	0	Producción baja de energía/ton de RSU
	500-1,000	1	Producción media de energía/ton de RSU
	>1,000	2	Producción alta de energía/ton de RSU
Costos de inversión por tonelada tratada (USD/ton)	>800	0	Representa los costos más altos de tratamiento
	500-800	1	Representa costos intermedios de tratamiento
	<500	2	Representa los costos más bajos de tratamiento
Costos de operación y mantenimiento (USD/ton)	>115	0	Representa los costos más altos de tratamiento
	75-115	1	Representa costos intermedios de tratamiento
	<75	2	Representa los costos más bajos de tratamiento



5.3 Asignación de pesos para cada criterio

Ya que no todos los criterios mencionados resultan de igual importancia, es necesario ponderar cada elemento a fin de asignarle la prioridad correcta para llevar a cabo el proceso de evaluación. A continuación se muestra el peso que se asignó a cada criterio.

Tabla 30. Ponderación de cada criterio

Criterio	Peso (%)
Temperatura de reacción (°C)	10
Productos del proceso	11
Capacidad de tratamiento (ton/día)	10
Rechazos %	12
Emisiones a la atmósfera	10
Instalaciones existentes	10
Producción bruta de electricidad kWh/ton	15
Costos de inversión (USD/ton)	11
Costos de operación y mantenimiento (USD/ton)	11
Total	100

5.4 Evaluación

La evaluación que se llevará a cabo es del tipo multicriterio en la que se evalúan 4 alternativas de tratamiento térmico para valorización de los RSU con 9 criterios cuantitativos.

Para llevar a cabo esta evaluación se ha seleccionado el uso del software Decision Lab 2000®, cuyo principal propósito es ayudar al tomador de decisiones en los problemas de selección o de jerarquización de alternativas posibles, que están sometidas a una evaluación multicriterio donde, generalmente, existen criterios que se encuentran en conflicto. Dado que al considerar varios criterios, no es posible establecer un orden total, y que, por tanto, no existe una solución óptima, es decir, aquella alternativa que satisfaga simultáneamente todos los criterios, el método que emplea proporciona dos posibilidades para resolver la ordenación: un preorden parcial PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations), I y un preorden completo PROMETHEE II,



ambas sobre el conjunto de alternativas factibles., mediante ambas técnicas, el software realiza una comparación binaria de las alternativas, para ordenarlas según su dominio o debilidad con respecto a las demás.

Con base en la información contenida en la Tabla 27, y considerando los puntajes definidos, se ha llevado a cabo la calificación de las tecnologías térmicas, como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Matriz de decisión

	Incineración	Gasificación convencional	Gasificación por arco de plasma	Pirólisis
Temperatura de reacción (°C)	2	2	1	0
Productos del proceso	1	2	2	1
Capacidad de tratamiento (ton/día)	2	2	1	0
Rechazos %	0	1	1	1
Emisiones a la atmósfera	0	1	2	1
Instalaciones existentes	2	1	0	0
Producción bruta de electricidad kWh/ton	0	2	2	1
Costos de inversión (USD/ton)	2	1	0	1
Costos de operación y mantenimiento (USD/ton)	2	1	1	1
	11	13	10	6

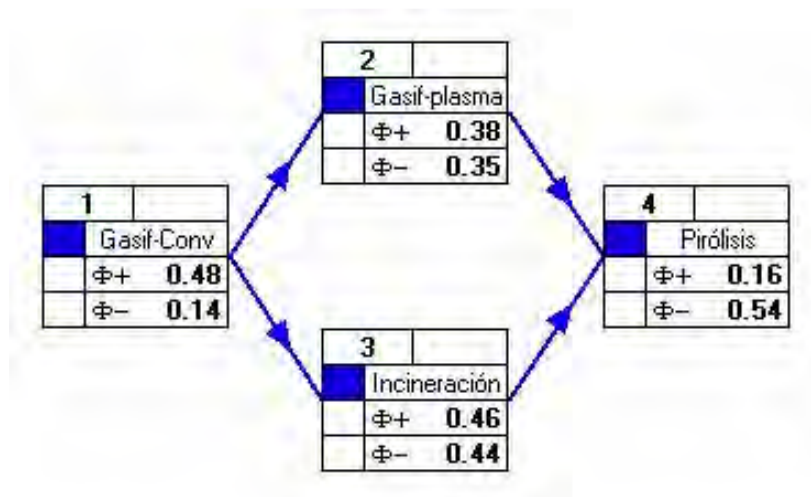
Utilizado la información de la Tabla 31 así como la ponderación correspondiente a cada criterio de evaluación (Tabla 30), se realizó la alimentación del software Decision Lab 2000 ®.



5.5 Resultados de la evaluación

Como se mencionó anteriormente Decision Lab 2000 ® muestra dos posibilidades para resolver la ordenación de alternativas PROMETHEE⁸ I y PROMETHEE II. Mediante PROMETHEE I se obtienen los resultados mostrados en la Figura 27 en la cual se muestra que la mejor alternativa, de acuerdo a los criterios evaluados y los pesos asignados, es la gasificación convencional pero se presenta una incomparabilidad entre gasificación por plasma e incineración, debido a que se llevó a cabo un ordenamiento parcial.

Figura 27. Orden preferencial parcial

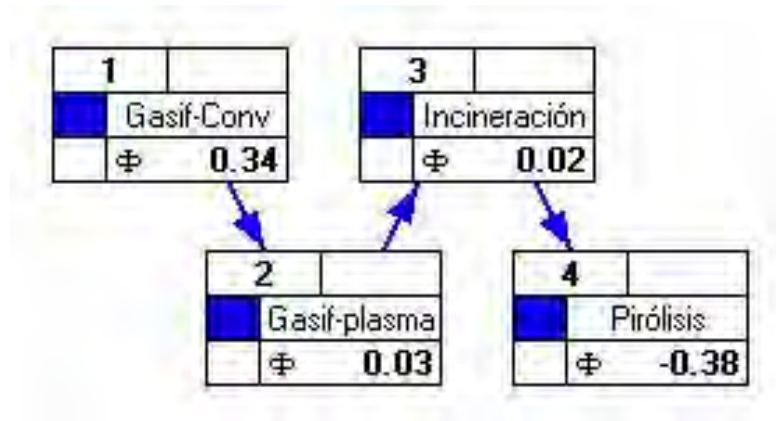


Para resolver la problemática de la incomparabilidad se utiliza el método PROMETHEE II que ofrece un orden preferencial total, y que arroja los resultados mostrados en la Figura 28, en el cual se obtiene que la gasificación convencional es la primera alternativa.

⁸ Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation



Figura 28. Orden preferencial total



5.6 Conclusiones del capítulo

A partir de la evaluación realizada se concluye que la mejor opción de tratamiento térmico para los residuos sólidos urbanos, en la que se dio mayor peso al criterio de generación de energía eléctrica y a los costos tanto de inversión como de mantenimiento y operación, es la gasificación convencional seguida de la gasificación por arco de plasma, mientras que la pirólisis se encuentra en último sitio. Los resultados podrían verse modificados dependiendo del peso que el evaluador le asigne a cada criterio y esto dependerá de las necesidades específicas a resolver.



6. Experiencias en la aplicación de la mejor alternativa de tratamiento térmico y generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos.

De acuerdo a la evaluación realizada en el capítulo 5 la tecnología de gasificación convencional es la que presenta mayores beneficios para la conversión térmica de los RSU, por lo que es indispensable mostrar la aplicación de esta tecnología alrededor del mundo, como ejemplo de su operación y de las características técnicas y económicas

Alrededor del mundo existen más de 200 instalaciones de gasificación que utilizan como materia prima principalmente carbón, coque, petróleo y gas, y en menor medida la biomasa (incluyendo a los residuos sólidos urbanos), para generar productos químicos como amoníaco y metanol, combustibles gaseosos y energía eléctrica.

En Japón la tecnología de gasificación se encuentra en una etapa madura ya que para una población de 101,228,471 habitantes y sólo con una superficie de 377,835 km² el tema de disposición final es de relevante importancia, cuenta con más de 20 instalaciones de gasificación de residuos sólidos urbanos (RSU) con diversos tipos de tecnologías, incluyendo la de plasma y sistemas de fusión directa.

En la actualidad, la gasificación de residuos sólidos urbanos (RSU) ha empezado a cobrar mayor importancia en los países occidentales y a presentarse como opción factible para la disposición final de RSU, ejemplo de esto es Estados Unidos, donde se han llevado a cabo estudios sobre la aplicación de esta tecnología y ya existen proyectos en desarrollo para su implementación. Una ventaja adicional de la tecnología de gasificación de RSU es que comparado con otros procesos como el de incineración es más amigable con el ambiente.



A continuación se presenta el resultado de una investigación sobre algunas experiencias de aplicación de la gasificación como tratamiento térmico de los RSU.

6.1 Interstate Waste Technologies (IWT), tecnología Thermoselect

Interstate Waste Technologies (IWT) es una empresa privada que diseña, construye y opera instalaciones de tratamiento de residuos, usando el proceso patentado Thermoselect(100)

El proceso Thermoselect® mostrado en la Figura 29 es una tecnología de gasificación y fusión de cenizas cuyo fin es la obtención de gas de síntesis, materias minerales vitrificadas útiles, así como metal rico en hierro y azufre, sometiendo los desechos domésticos e industriales así como la basura especial a un proceso ininterrumpido de reciclaje que consiste en la gasificación a altas temperaturas de los componentes orgánicos y la fusión directa de los inorgánicos presentes en la basura. En la primera fase del proceso, los desechos son conducidos sin tratamiento previo hasta una prensa que los compacta, distribuye sus residuos líquidos y les extrae el aire restante. Los residuos compactados son empujados hacia un canal de desgasificación movidos por los posteriores paquetes de residuos; dentro del desgasificador (donde ocurre una pirolisis) se calientan por la radiación proveniente de la cámara de alta temperatura (101). Al aumentar la temperatura del agua contenida en los desechos, ésta se evapora y los compuestos orgánicos son parcialmente gasificados, el área de la sección transversal se incrementa ligeramente según se acerca al reactor de alta temperatura, facilitando el movimiento de los paquetes de residuos y el transporte de los gases hacia el interior del reactor. El carbón contenido en los residuos reacciona con el oxígeno y se produce energía que es utilizada para la gasificación de la materia combustible y para el fundido de la materia incombustible llegando ésta a temperaturas de 2,000 °C. El gas de síntesis está sujeto a una limpieza de varias fases, durante la cual se absorben o condensan

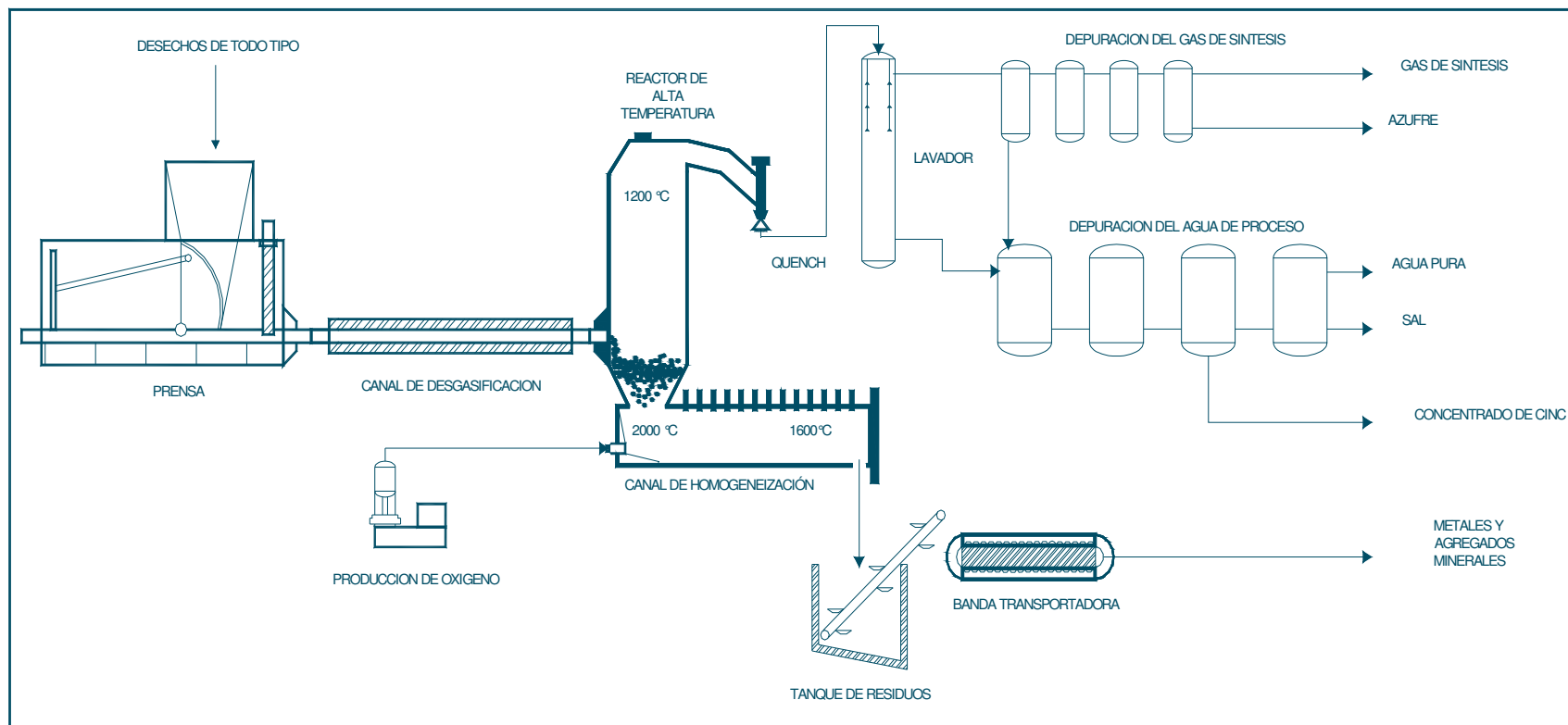


Experiencias en la aplicación de la mejor alternativa de tratamiento térmico y generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos.

los contaminantes, con lo cual queda disponible el gas de síntesis, ya purificado, como portador de energía o como materia prima. Por otro lado, los constituyentes inorgánicos fundidos son homogeneizados en un canal anexo al reactor de altas temperaturas. A aproximadamente 1,600° C por diferencia de densidades son formadas dos fases, una de minerales y otra de metales. La masa fundida es granulada mediante un enfriamiento ultrarrápido con agua. Los granulados minerales y metálicos se clasifican en el exterior del sistema mediante separación magnética. La calidad de los agregados minerales vítreos como el cobre y níquel equivale a la de los productos naturales(101)



Figura 29. Esquema del proceso de gasificación de gasificación Thermostelect®



Fuente: Modificado de (101)



6.1.1 Chiba, Japón



La primera instalación de Thermoselect en Japón se realizó en Chiba, Tokio, la cual se encuentra en operación desde el otoño de 1999. Cuenta con 2 líneas de operación que en conjunto tienen una capacidad de 100,000 toneladas anuales. El 13 de abril de 2000, el licenciatario de Thermoselect en Japón, Kawasaki Steel Corporation, recibió un permiso de la Asociación de Gestión de Residuos de Japón para el uso general de la tecnología Thermoselect en Japón. La instalación se utiliza para la eliminación de residuos domésticos, comerciales e industriales.

La tecnología utilizada es denominada por Thermoselect como de alta temperatura de gasificación, esta tecnología incluye una cámara de desgasificación inicial (pirólisis), que descompone los RSU en gas de síntesis y en materia calcinada mezclada con los componentes inorgánicos de los RSU. La materia calcinada entra a la cámara de gasificación donde se agrega oxígeno para completar la gasificación de ésta y transformarla en más gas de síntesis. El gas generado se mantiene a 1,200 °C durante 2 o más segundos, seguido de un enfriamiento a aproximadamente 70 °C en una atmósfera libre de oxígeno para la minimizar la generación de dioxinas, y luego se recupera el gas generado en forma de gas combustible. En cuanto a los compuestos inorgánicos, estos son llevados a valores de temperatura mayores de los 1,600 °C en el fondo del reactor (donde se agrega oxígeno) provocando el fundido de los mismos.

Aproximadamente el 80% del gas de síntesis se transmite a una acería vecina en Chiba. Un motor de gas de 1.5 MW es utilizado para generar electricidad en la instalación Thermoselect. Esta planta ha estado trabajando en colaboración con Toshiba, en





pruebas de una celda de combustible de 200 kW para el uso de gas de síntesis con el fin de lograr en el futuro la mayor eficiencia posible para la conversión en energía eléctrica (102).

Tabla 32. Datos técnicos de la planta Chiba, Japón de Thermostelect

Rubro	Descripción
Nombre de la firma	Interstate Waste Technologies Malvem, PA
Nombre de las instalaciones	Chiba
Ubicación	Chiba, Japón
Año de inicio de operaciones	2000
Tecnología	Thermostelect (Gasificación y fusión de cenizas)
Tipo de residuos que son tratados	Residuos sólidos urbanos e industriales
Características de la alimentación	Poder calorífico 7-13MJ/kg Contenido de humedad 30-60
Capacidad (ton/día)	300, en 2 líneas de 150 c/u
Temperatura en el gasificador (°C)	1,200- 2,000
Pre tratamiento	Compactación de residuos y desgasificación
Tratamiento posterior	Limpieza de gas y tratamiento de agua
Productos	Electricidad a partir de gas de síntesis
Subproductos	Slag 7-15% Azufre Sales minerales Concentrado de zinc
Potencia eléctrica instalada	Para fines de demostración y ensayo 1.5 MW



Experiencias en la aplicación de la mejor alternativa de tratamiento térmico y generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos

Rubro	Descripción																																				
Tipo de generador de potencia eléctrica	1 motor de gas Jenbacher de 20 cilindros 1.5 MWe 1 celda de combustible Toshiba de 200 kW																																				
Emisiones al ambiente	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Contaminante</th> <th>Límites máximos EU</th> <th>Emisiones</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NOx (mg/m³)</td> <td>200</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>CO (mg/Nm³)</td> <td>50</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>HCl (mg/Nm³)</td> <td>10</td> <td>ND</td> </tr> <tr> <td>Partículas (mg/Nm³)</td> <td>10</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>COV (mg/Nm³)</td> <td>10</td> <td>ND</td> </tr> <tr> <td>SO₂ (mg/Nm³)</td> <td>50</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Ni+As Pb+Cr+Cu+Mn (mg/Nm³)</td> <td>0.5</td> <td>ND</td> </tr> <tr> <td>HF (mg/Nm³)</td> <td>1</td> <td>ND</td> </tr> <tr> <td>Cd+ TI y sus compuestos (mg/Nm³)</td> <td>0.05</td> <td>ND</td> </tr> <tr> <td>Dioxinas y furanos (ng/Nm³)</td> <td>0.1</td> <td>0.0011</td> </tr> <tr> <td>Hg (mg/Nm³)</td> <td>0.05</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Contaminante	Límites máximos EU	Emisiones	NOx (mg/m ³)	200	13	CO (mg/Nm ³)	50	17	HCl (mg/Nm ³)	10	ND	Partículas (mg/Nm ³)	10	0.2	COV (mg/Nm ³)	10	ND	SO ₂ (mg/Nm ³)	50	2	Ni+As Pb+Cr+Cu+Mn (mg/Nm ³)	0.5	ND	HF (mg/Nm ³)	1	ND	Cd+ TI y sus compuestos (mg/Nm ³)	0.05	ND	Dioxinas y furanos (ng/Nm ³)	0.1	0.0011	Hg (mg/Nm ³)	0.05	
	Contaminante	Límites máximos EU	Emisiones																																		
	NOx (mg/m ³)	200	13																																		
	CO (mg/Nm ³)	50	17																																		
	HCl (mg/Nm ³)	10	ND																																		
	Partículas (mg/Nm ³)	10	0.2																																		
	COV (mg/Nm ³)	10	ND																																		
	SO ₂ (mg/Nm ³)	50	2																																		
	Ni+As Pb+Cr+Cu+Mn (mg/Nm ³)	0.5	ND																																		
	HF (mg/Nm ³)	1	ND																																		
	Cd+ TI y sus compuestos (mg/Nm ³)	0.05	ND																																		
	Dioxinas y furanos (ng/Nm ³)	0.1	0.0011																																		
Hg (mg/Nm ³)	0.05																																				
Área ocupada	ND																																				
Servicios requeridos	Gas natural (aprox. 250 Nm ³ /h por línea) Oxígeno Nitrógeno Agua Electricidad																																				
Costos de inversión (USD)	80,000,000																																				
Costos de operación y mantenimiento anuales (USD)	13,000,000																																				
a) Costos de operación por MWh producido (USD/MWh)	1,083																																				
b) Generación de energía por tonelada tratada (MWh/ton)	0.12																																				
c) Costos de operación y mantenimiento por tonelada tratada (USD/ton)	130																																				

Fuente: Elaboración propia a partir de (102) y (103)

a) Para la obtención de los costos de operación por Megawatt-hora generado se han considerado 8000 horas de operación anual y un factor de planta de 0.8. Se calculó dividiendo los costos de operación anuales entre los MWh anuales generados.

b) Obtenido de la relación entre los MWh estimados generados y las toneladas anuales tratadas

c) El costo de operación por tonelada tratada es el resultado de dividir los costos de operación y mantenimiento entre las toneladas anuales tratadas.



6.2 EBARA

6.2.1 Chiba (planta piloto)

Esta planta utiliza un gasificador de lecho interno circulante fluidizado (ICFG) usando pirólisis acoplado con un quemador.

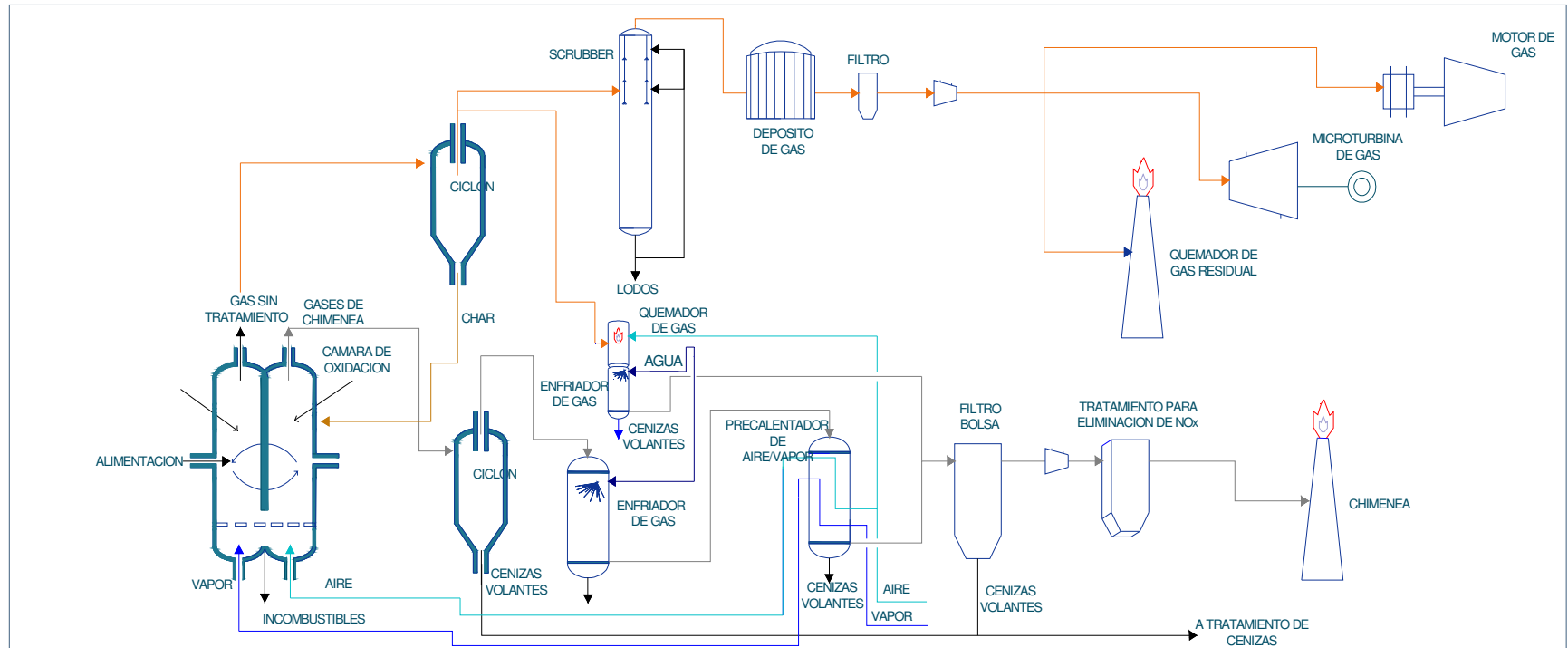
La planta se encuentra ubicada en Nakasode 3-1 en la Ciudad de Sodegaura, prefectura de Chiba, Japón. El proceso de tratamiento sólo incluye la remoción manual de objetos con dimensiones mayores a 300 mm.

El reactor integra una sección de pirólisis y una sección de oxidación, usando arenas fluidizadas que se mueven entre las dos secciones. En la sección de pirólisis, el vapor es inyectado para la fluidización (el aire fluidizado no puede ser utilizado desde el proceso de pirólisis). Las arenas calientes transfieren su energía calorífica a los RSU, obteniendo una descomposición térmica de los compuestos orgánicos. La materia que no se ha carbonizado y las cenizas caen en la cama de arena y son transferidas a la cámara de oxidación para su combustión. La combustión calienta las arenas que luego son llevadas a la sección de pirólisis para proveer calor. El gas de síntesis es limpiado en un scrubber, el gas de síntesis limpio es quemado en un motor recíprocante para producción de energía eléctrica. El gas caliente de escape pasa por un sistema de recuperación de calor, el cual calienta el aire usado en la cámara de oxidación/combustión. Los gases de combustión calientes que provienen de la sección de combustión fluyen a través de una caldera de recuperación de calor donde se produce vapor para el proceso de fluidización en la cámara de pirólisis. Los gases de combustión enfriados salen de la caldera entrando a un filtro y a continuación a un sistema de reducción catalítica selectiva para finalmente salir por la chimenea (91).



Experiencias en la aplicación de la mejor alternativa de tratamiento térmico y generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos

Figura 30. Esquema del proceso de gasificación de gasificación TwinRec de EBARA



Fuente: Modificado de (91)



Tabla 33. Datos técnicos de la planta de Ebara en Chiba, Japón

Rubro	Descripción
Nombre de la firma	Ebara Corporation. Tokio, Japón
Nombre de las instalaciones	Sodegaura ICFG planta piloto # 1
Ubicación	Nakasode 3-1 Ciudad Sodegaura en la prefectura de Chiba
Fecha de inicio de operaciones	2004
Desarrollador	Ebara
Tecnología	ICFG
Tipo de residuos que son tratados	RSU
Capacidad (ton/día)	15
Temperatura en el gasificador (°C)	600-700
Pre tratamiento	Sólo es necesario que la alimentación tenga un tamaño menor a 30 cm
Tratamiento posterior	Tratamiento del gas
Productos	Electricidad
Subproductos	Cenizas Metales
Potencia eléctrica instalada (MW)	ND
Tipo de generador de potencia eléctrica	Micro turbina de gas
Emisiones al medio ambiente	ND
Área ocupada	ND



Rubro	Descripción
Servicios requeridos	Agua Vapor Otros
Costos de inversión (USD)	ND
Costos de operación y mantenimiento anuales (USD)	ND

Fuente: Elaboración propia a partir de (104) y (91)

6.3 *Schwarze Pumpe SVZ, Alemania*

6.3.1 *Schwarze Pumpe SVZ*



La planta empezó su producción en el año 1964 con 24 gasificadores de lecho fijo gasificando lignito⁹ la planta suministraba aproximadamente el 75% del total de consumo de gas de la ciudad. Después de la reunificación Alemana, la producción de gas de la ciudad a partir de lignito se

sustituyó por gas natural.

En 1996, Schwarze Pumpe - ahora Sekundärrohstoff Verwertungszentrum SVZ Schwarze Pumpe "(Centro de reuso de materias primas secundarias) - fue adquirida por BWB-Berliner Wasserbetriebe y sobre la base de las nuevas leyes y reglamentos ambientales para la reutilización de materiales de

⁹ Carbón fósil de formación más reciente que la hulla. Es un combustible de calidad intermedia entre el carbón de turba y el carbón bituminoso, del tipo húmico rico en humina y en ácidos húmicos.



desecho, se decidió seguir adelante con la ruta de gasificación ya que la mayoría de las unidades que componen la cadena de proceso de gasificación han estado disponibles en el sitio, además que en comparación con los métodos convencionales de combustión la gasificación ofrece la ventaja de producir gas de síntesis para la producción de metanol o gas combustible para la producción de energía .

Actualmente son tres los tipos de gasificadores que se están utilizando comercialmente:

5 gasificadores de lecho fijo presurizado para residuos sólidos (Capacidad de cada gasificador: 15 ton/h)

1 gasificador British gas/Lurgi para residuos sólidos (Capacidad 35 ton/h)

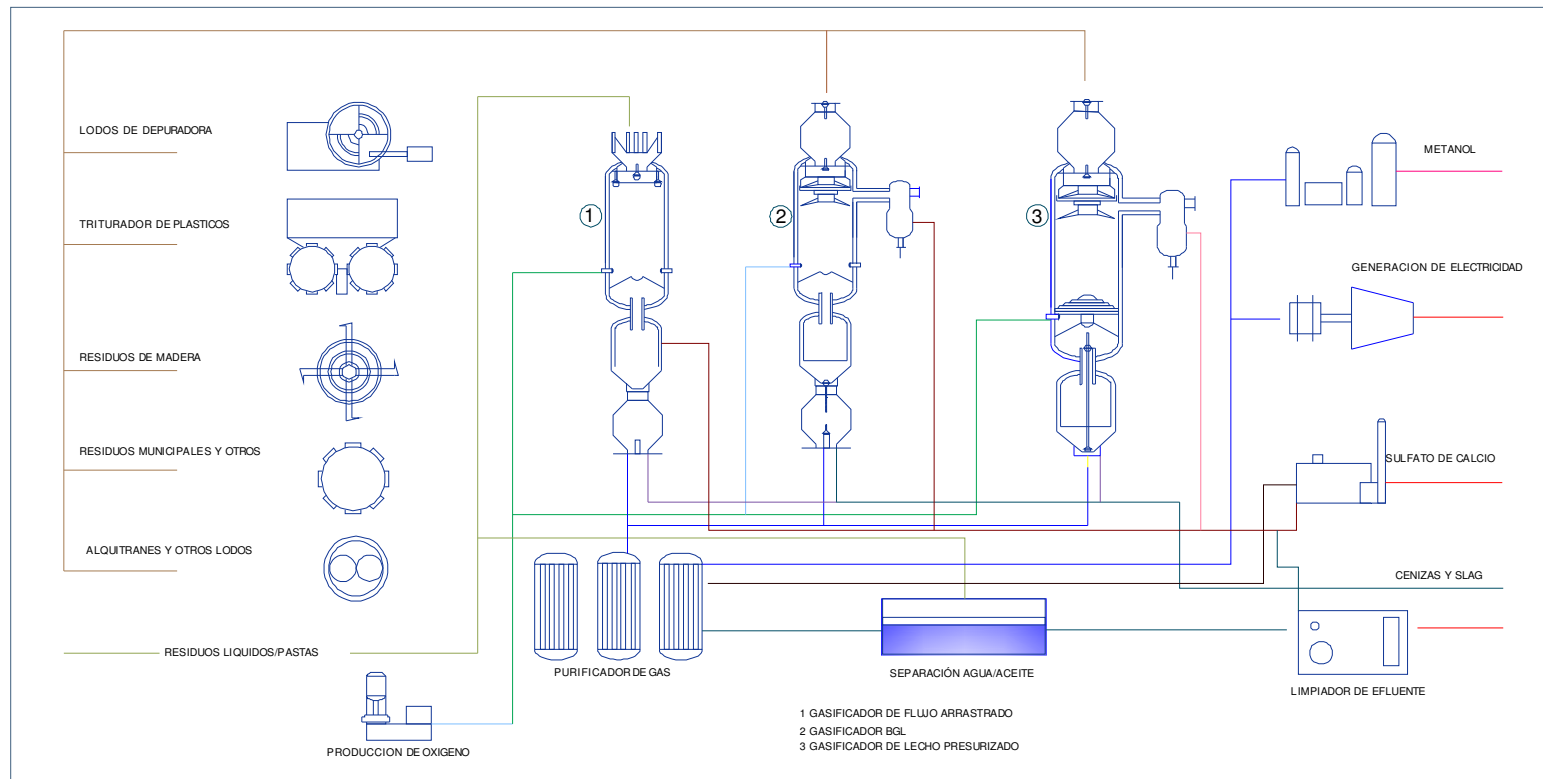
2 Gasificadores de flujo arrastrado para líquidos y residuos pastosos que llega a temperaturas de 1600 °C (16 ton/h por cada gasificador, diámetro 3.65 m tamaño del lecho 6 m operando a 3 a 4 m, temperatura del gas 1500 °C para el carbón y 790 para los residuos) (105)

Los residuos aplicables a la gasificación tienen que cumplir con ciertas características como son densidad, firmeza de los residuos, tamaño y estabilidad térmica, para lo cual tienen que ser sometidos a diversos tratamientos dependiendo del tipo de residuo del que se trate, este pretratamiento puede incluir remoción de metales, cortado, secado, entre otros con la finalidad de peletizar los residuos (105).



Descripción de los principales trenes de los sistemas de conversión térmica de residuos sólidos urbanos

Figura 31. Esquema del proceso de gasificación de Schwarze Pumpe



Fuente: Modificado de (106)



Tabla 34. Datos técnicos de la planta Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum, Alemania de SVZ

Rubro	Descripción
Nombre de la firma	Global Energy
Nombre de las instalaciones	SVZ Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum
Ubicación	Spreetal, Alemania
Fecha de inicio de operaciones	Desde 1964 y a partir del 2000 con gasificación de diversos residuos
Desarrollador	SVZ
Tecnología	Gasificador tipo Lurgi, gasificador de lecho fijo
Tipo de residuos que son tratados	Residuos y carbón
Capacidad (ton/día)	840
Temperatura en el gasificador (°C)	800-1,600
Pre tratamiento	Diversos para peletización
Tratamiento posterior	ND
Productos	Metanol Electricidad
Subproductos	Slag
Potencia eléctrica instalada	ND
Potencia eléctrica generada	75 MWe
Tipo de generador de potencia eléctrica	Turbina de gas



Descripción de los principales trenes de los sistemas de conversión térmica de residuos sólidos urbanos

Rubro	Descripción
Emisiones al medio ambiente	Emisiones anuales Directa al agua : Nitrógeno total 72.5 t Cd y compuestos 0.01 t Cu 0.06 t Ni 0.06 t Fenoles 0.03 t COT 205 t Aire: CO ₂ 1,210,000 t NOx 414 t EEA . The European Pollutant Emission Register
Servicios requeridos	Aire Oxígeno Agua Otros
Costos de inversión (USD)	ND
Costos de operación y mantenimiento anuales (USD)	ND

Fuente: Elaboración propia a partir de (105)



6.4 SUMITOMO

6.4.1 Niihama (planta piloto)



Sumitomo Heavy Industries, Ltd (SHI) construyó una planta de demostración de 20 toneladas/día para el tratamiento térmico de RSU en sus instalaciones de Niihama. Esta planta de demostración ha estado operando desde 1999.

Después de un pretratamiento, que consiste en un fragmentador y un secador de residuos, éstos son alimentados al gasificador de lecho

fluidizado burbujeante a temperatura de aproximadamente 800 °C, operando a una presión de 1.2 bar donde son convertidos térmicamente en 1800 m³ de gas combustible con un poder calorífico bajo. Las cenizas de fondo que salen del gasificador son fundidas y convertidas en *slag* en un horno, a temperaturas aproximadas de 1300 °C, usando una parte del flujo de gas combustible. El *slag* puede ser empleado como material de construcción (107).

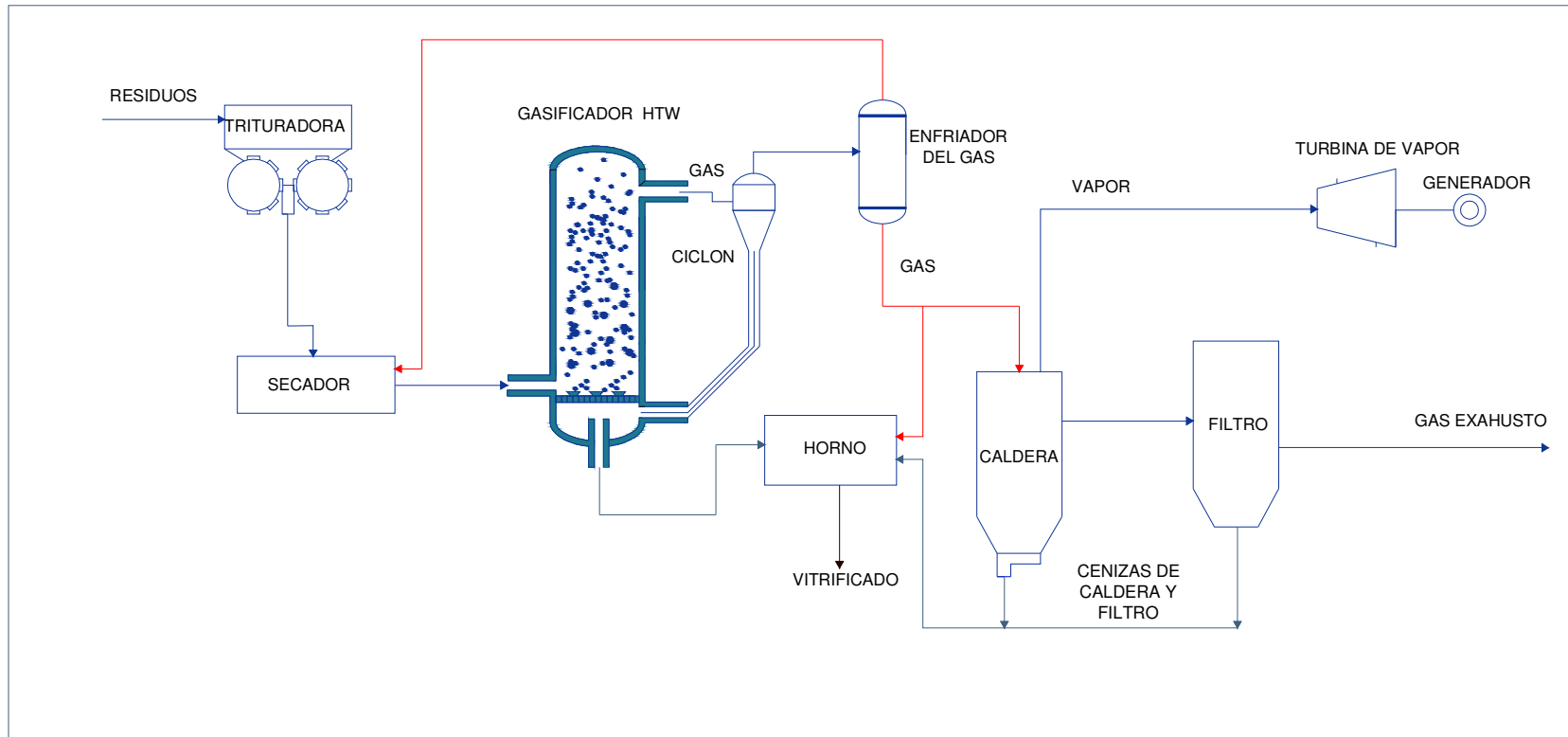
Características

- 1) Sistema de gasificación fluidizado.- Sistema que ha operado en Europa y ha obtenido la mejor valoración. Horno de fusión rotativo se aprobó y ha sido operado en las 9 plantas en Europa y 7 de Japón.
- 2) Alta eficiencia de generación de electricidad.-El gas de pirólisis es generado por los residuos de la gasificación y este gas está disponible para proveer la energía para el pre-secado de los residuos, para la fusión y para la generación de vapor.
- 3) Escoria Homogénea.-Los residuos de la escoria pasan un largo tiempo en el horno rotativo, por lo que son fundidos completamente

El gas de salida es limpiado por equipos de control de contaminación atmosférica y la densidad de las dioxinas es inferior 0.01ng-TEQ/m³N.



Figura 32. Esquema del proceso de gasificación utilizado por Sumitomo



Fuente: Modificado de (108)



Descripción de los principales trenes de los sistemas de conversión térmica de residuos sólidos urbanos

Tabla 35. Datos técnicos de la planta piloto en Niihama de Sumitomo.

Rubro	Descripción
Nombre de la firma	Sumitomo Heavy Industries Ltd.
Nombre de las instalaciones	Niihama
Ubicación	Japón
Fecha de inicio de operaciones	1999
Desarrollador	Sumitomo
Tecnología	Proceso PreCon®
Tipo de residuos que son tratados	Residuos sólidos urbanos
Capacidad (toneladas/día)	20
Intervalo de temperatura que maneja (°C)	800-1,300
Pre tratamiento	Triturado de residuos y secado
Tratamiento posterior	Limpieza del gas
Productos	Gas de síntesis
Subproductos	Slag
Potencia eléctrica generada	ND
Tipo de generador de potencia eléctrica	Turbina de vapor
Emisiones al medio ambiente	Aire: Dioxinas menores a 0.01ng-TEQ/m ³ N.
Área ocupada	ND
Servicios requeridos	ND
Costos de inversión (USD)	ND
Costos de operación y mantenimiento anuales	ND

Fuente: Elaboración propia a partir de (109)

ND: No disponible



6.5 Conclusiones del capítulo

La tecnología de gasificación convencional se ha desarrollado principalmente en Japón, en la cual existen diversas compañías que la comercializan. La instalación de gasificación que mayor tiempo tiene en operación es la de SUMITOMO en Japón, instalada en el año 1999, pero es a escala piloto mientras que la planta de mayor capacidad instalada es la de SVZ en Alemania, que trata 840 toneladas al día pero gasifica residuos urbanos combinados con carbón, generando 75 MWe.

De acuerdo a las experiencias de aplicación de la gasificación mostradas en este capítulo, el tratamiento térmico de los residuos mediante gasificación requiere un acondicionamiento de éstos previo a su ingreso a la etapa de reacción, dicho acondicionamiento puede ser desde una remoción de los residuos de gran tamaño hasta una peletización de los mismos, dependiendo de la tecnología. En cuanto a la generación de energía eléctrica ésta se lleva a cabo mediante turbinas de gas, turbinas de vapor o motores, dependiendo del producto aprovechado del proceso (el gas de síntesis o la energía calorífica de los gases).

Todas las instalaciones mostradas cuentan con un sistema de limpieza de gases, en el que los equipos de limpieza comunes a todas las tecnologías son el lavador de gases y los filtros, debido a que es necesario el enfriamiento del gas y la remoción de la materia particulada.



7. Conclusiones

- La situación actual de la disposición final de los RSU es crítica, el único relleno sanitario con el que cuenta el Distrito Federal debe ser clausurado a la brevedad, en la ciudad no existe espacio para crear un nuevo relleno sanitario y el gobierno aun no implanta una estrategia que permita la gestión adecuada de los RSU.
- La generación de RSU en el D.F. supera las 13,000 toneladas al día, su composición corresponde a un 60% de residuos inorgánicos y un 40% de residuos orgánicos, el poder calorífico estimado sin preselección es de 12,981 kJ/kg y con preselección (segregación de las corrientes orgánica y de reciclaje que podrían ser valorizadas) es de 13,186 kJ/kg, superando el mínimo necesario para mantener una combustión sin aporte de combustible adicional, lo que abre la posibilidad de su uso mediante tecnologías de tratamiento térmico como combustible para la generación de energía eléctrica.
- Existe una amplia diversidad de tecnologías para el tratamiento térmico de los RSU. Los principales trenes de los sistemas de conversión térmica de residuos sólidos urbanos se componen de las siguientes etapas: la primera consiste en el acondicionamiento de los RSU con el fin de obtener una fracción con un poder calorífico lo más alto posible, la segunda es el sistema de tratamiento térmico (incineración, gasificación o pirólisis), la tercera es el sistema de limpieza de gases y la cuarta etapa es el sistema de recuperación de energía (calderas, turbinas de vapor o gas; o motores de combustión).
- Se evaluaron las principales tecnologías térmicas para el tratamiento de RSU: incineración, gasificación convencional, gasificación por arco de plasma y pirólisis. De acuerdo a los principales criterios técnico-económicos asociados a las tecnologías térmicas, tales como temperatura de reacción, productos del proceso, capacidad de operación, cantidad de



electricidad producida y costos tanto de inversión como de operación y mantenimiento, entre otros criterios, se ha seleccionado como la mejor opción de tratamiento térmico de RSU aplicable al D.F. a la tecnología de gasificación convencional, aunque la gasificación por arco de plasma ofrece ciertas ventajas como la capacidad de procesar cualquier tipo de residuos.

- Aunque la tecnología de gasificación de RSU aún se encuentra en desarrollo, ha tenido gran aceptación a nivel mundial, prueba de ello es el incremento en el número de plantas instaladas (aproximadamente 50 plantas). Brindando mayor certidumbre a su estudio y puesta en marcha, incrementando las posibilidades de su aplicación en el D.F.
- Es urgente un nuevo esquema de gestión en el que exista la responsabilidad compartida comunidad-autoridad, en donde prevalezcan los principios de la reducción, el reciclaje y la reutilización; en el cual tengan cabida proyectos de valorización energética de los RSU.



8. Referencias

1. **INEGI.** [En línea] 2005. [Citado el: 18 de Febrero de 2009.] <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/default.aspx?tema=me&e=09>.
2. **CONAPO.** *De la población de México 2005-2050* . 2009.
3. **Estrada, Ricardo.** *Subdirector de reciclaje /DTDF/DGSU/SOS.* Distrito Federal, 30 de Octubre de 2009.
4. **El Economista.** Cerrarán en agosto el Bordo Poniente. [En línea] Julio de 2008. [Citado el: 20 de Marzo de 2009.] <http://eleconomista.com.mx/node/186555>.
5. **Gobierno del Distrito Federal.** Inventario de residuos sólidos urbanos. [En línea] 2007. [Citado el: 26 de Marzo de 2009.] http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario/residuos_solidos_web.html.
6. *Inventario de RSU del D.F. . 2007.*
7. **Gobierno del Distrito Federal.** Inventario de residuos sólidos urbanos. 2008.
8. —. *Inventario de RSU del D.F. 2008.* Distrito Federal : s.n., 2008.
9. **INEGI.** Instituto Nacional de geografía y estadística. [En línea] Con base en SEDESOL. [Citado el: 20 de 02 de 2009.] <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mamb126&s=est&c=6123>.
10. **Gobierno del Distrito Federal.** Inventario de residuos sólidos urbanos. [En línea] 2008. [Citado el: 26 de Marzo de 2009.] http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario/residuos_solidos_web.html.
11. **Valenzuela., Víctor Flores.** *Selección y recuperación de Residuos Sólidos Urbanos.* Distrito Federal : FORO INTERNACIONAL PARA GESTIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL RECICLADO Y APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS., 2009.
12. **Blanco Sánchez, Paula H.** Producción de gas de síntesis por medio de la tecnología de gasificación por arco de plasma térmico a partir de residuos sólidos urbanos. [*Tesis para obtener el grado de Ingeniería Química. Facultad de Química*]. UNAM. México, D.F. : s.n., 2008.
13. **Servicios Urbanos.** Recolección, transferencia, selección y disposición final. [En línea] [Citado el: 25 de Marzo de 2009.] http://www.obras.df.gob.mx/servicios_urbanos/residuos/rec_trans_sel_final.html.
14. **La crónica.** Cerrarán el 30 de noviembre el Bordo Poniente. [En línea] 31 de Julio de 2008. [Citado el: 15 de Abril de 2009.] http://www.cronica.com.mx/nota.php?id_notas=377114.
15. **SEMARNAT.** *Comunicado de prensa Núm. 161/08.* Distrito Federal : s.n., 19 de agosto de 2008.
16. **El Universal.** Recurre GDF a basureros del Edomex. [En línea] 20 de Enero de 2009. [Citado el: 15 de Marzo de 2009.] <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/93734.html>.
17. —. GDF busca ampliar área útil en Bordo Poniente. [En línea] 31 de Marzo de 2009. [Citado el: 06 de Abril de 2009.] <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/94719.html>.
18. **Sheinbaum Pardo, Claudia, Vázquez Martínez, Oscar y Butrón Madrigal, Ligia.** Estrategia local de acción climática del Distrito Federal. [En línea] 2006. [Citado el: 07 de Abril de 2009.] http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/elac/13_estrategias_politicas_medidas_reduccion.pdf.



19. **Treviño, Jorge Fernández.** *El último Relleno de la Ciudad de México.* Distrito Federal : Foro Metropolitano de Tratamiento de desechos. "Por un manejo inteligente de residuos sólidos urbanos", Septiembre 12 y 13, 2007.
20. **Coordinación general de la comisión para la gestión integral de los residuos.** *Resumen de avances.* Distrito Federal : s.n., 2008.
21. **La Jornada.** Negocia el GDF uso de biogás que se generará en el relleno del Bordo Poniente. [En línea] 4 de Enero de 2009. [Citado el: 20 de 03 de 2009.] <http://www.jornada.unam.mx/2009/01/04/index.php?section=capital&article=027n1cap>.
22. **El Universal.** Por crisis, edificarán sólo dos centros de reciclaje. [En línea] 15 de Abril de 2009. [Citado el: 16 de Abril de 2009.] <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/94956.html>.
23. **La jornada.** Propone SME planta para tratar basura. [En línea] 25 de Septiembre de 2007. [Citado el: 15 de Mayo de 2009.]
24. **Gengel, Yunus A. y Boles, Michael.** *Termodinámica.* s.l. : Mc Graw Hill, 2006.
25. **Xavier Elias.** *La incineración de residuos y su adecuación a la resolución 0058.* [En línea] Agosto de 2003. [Citado el: 06 de Mayo de 2009.] <http://www.cnplm.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID78.pdf>.
26. **Academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales.** *Factores de emisión de los combustibles colombianos.* Bogotá : s.n., 2003.
27. **OPS.** *Evaluación Regional de los Servicios de Manejo de los Residuos Sólidos Municipales en México.* Distrito Federal : s.n., 2003.
28. **George, y otros.** *Gestión integral de residuos sólidos.* España : McGraw-Hill, 1994.
29. *Biodegradación de residuos urbanos lignocelulósicos por pleurotus.* **Delfín Alcalá, Irma y Durán de Bazúa, Carmen.** 001, México : Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 2003, Vol. 19.
30. **PEMEX.** Glosario . [En línea] 2009. <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content§ionID=111&catID=11181>.
31. *New applications of Hess Law and comparison with models for determining calorific values of municipal solid wastes in the Sri Lankan context .* **Menikpura, S.N.M. y Basnayaque, B.F.A.** 34, Sri Lanka : Renewable Energy, 2009.
32. *Energy from gasification of solid wastes.* **Belgiorno, V., y otros.** 23, Fisciano, Italy : Waste management, 2003.
33. **Provincia de Chubut.** *Decreto 1675/1993 Anexo III.* Chubut, Argentina : s.n., 1993.
34. Ahorro y uso racional de la energía de combustión. [En línea] 02 de 09 de 2003. [Citado el: 24 de 03 de 2009.] http://atc-henares.iespana.es/files/Download/servicio_tecnico_nota_informativa_combustion_calderas_calentadores_gas.pdf.
35. **Arvizo Fernández, José Luis.** *Estimación del recurso y prospectiva energética de la basura en México.* Cuernavaca, Morelos : Gerencia de energías no convencionales, 2005.
36. **Rand, T., Haukohl, J. y Marxen, U.** *Municipal Solid Waste Incineration. Requirements for a Successful Project.* Washington D.C : The World Bank, 2000.
37. **McLanaghan, S.R.B.** *Delivering the landfill directive: The role of news and emerging technologies. Report for the strategy unit.* London : AiLE, 2002.



38. **Tchobanoglous, George, Theissen, Hilary y Eliassen, Rolf.** *Desechos sólidos. Principios de ingeniería y administración.* Venezuela : s.n., 1982.
39. **Castells, Xavier Elias y Cadavid, Carlos.** *Tratamiento y valorización energética de residuos.* Cataluña, España : Ediciones Díaz de santos, 2005. 8479786949, 9788479786946.
40. **Fernández Bremauntz, Adrián, Castro Díaz, José y Yarto Ramírez, Mario.** *Las sustancias tóxicas persistentes en México.* México, D.F. : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004. 968-817-703-2.
41. **Ingeniero Ambiental.** Incineración de residuos peligrosos. Horno de incineración. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2009.] www.ingenieroambiental.com/?pagina=1469.
42. **Organización Latinoamericana de Energía.** *Manual de gasificación : empleo de gasificadores y gasógenos en las áreas rurales de América Latina.* s.l. : OLADE, 1987.
43. **Anisa, Safriti.** *Biomass Gasification Using Bubbling Fluidized Bed: investigation of the effect of different Catalyst on Tar Reduction.* Eindhoven : s.n., 2005.
44. **Yassin, liban, y otros.** *Techno economic performance of energy from waste fluidized bed combustion and gasification process in the UK context.* Italy : Chemical Engineering, 2009.
45. *Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis.* **Mountouris, A., Voutsas, E. y Tassios, D.** 47, Atenas, Grecia : Energy Conversion and Management, 2006.
46. **D., Robert T. y Leatherman, Gary L.** *Plasma pyrolysis, gasification and vitrification of organic material.* US 6,987,792 B2 E.E.U.U., 17 de enero de 2006.
47. **Cadavid, Carlos, y otros.** *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos.* España : Ediciones Díaz de Santos, 2005.
48. *Plasma physics and technology; industrial applications.* **Bonizzoni, G. y Vassallo, E.** Milano, Italia : Vacuum, 2002, Vol. 64.
49. *Evolutionary Behavior of Syngas During Gasification.* **Ahmed, N. Noosai y A.K., Gupta.** Reno, Nevada : Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008, Vol. 46.
50. **Blanco Sánchez, Paula H.** Producción de gas de síntesis por medio de la tecnología de gasificación por arco de plasma térmico a partir de residuos sólidos urbanos. [Tesis para obtener el grado de Ingeniería Química. Facultad de Química]. UNAM. México, D.F. : s.n., 2008.
51. **Regional District of North Okanagan.** *Final Report Waste-to-Energy Review of Alternatives.* 2009.
52. *Production of synthesis gas by biomass gasification.* **Cobb, James T.** Houston, Texas : Spring National AIChE Meeting, 2007.
53. **Williams, Paul T.** *Waste Treatment and Disposal .* Reino Unido : John Wiley & Sons, Ltd., 2005.
54. *An overview of fast pyrolysis of biomass.* **Bridgwater, A.V., Meier, D. y Radlein, D.** s.l. : Organic Geochemistry, 1999, Vol. 30.
55. **Castells, Xavier Elías.** *La incineración de Residuos Sólidos inertes y peligrosos.1º parte -B Generalidades. Los residuos como combustibles. Sistemas de conversión energéticos.* Medellín : Bolsa de productos de Cataluña, Julio 2002.
56. **Williams, Paul T.** *Waste Treatment and Disposal.* s.l. : John Wiley & Sons , 2005. 0-470-84912-6.
57. *Biomass Pyrolysis.* **International Energy Agency Bioenergy .** s.l. : IEA Bioenergy, 2007.



58. *Energy and environmental analysis of an innovative system based on municipal solid waste (MSW) pyrolysis next term and combined cycle.* **Baggioa, Paolo, y otros.** 2-3, Italia : Applied Thermal Engineering, 2008, Vol. 28.
59. *Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis.* **Blasi, Colomba Di.** Nápoles, Italia : Progress in Energy and Combustion Science, 2008, Vol. 34.
60. *Fuel oil quality of biomass pyrolysis oils state of the art for the end user.* **Oasmaa, A. y Czernik, S.** s.l. : Energy Fuels, 1999, Vol. 13.
61. **Jaén, René Lesme.** [En línea] [Citado el: 10 de 06 de 2009.] <http://www.cengicana.org/Portal/SubOtrasAreas/Cogeneracion/Presentaciones/PirolysisBiomasa.pdf>
62. **García Cortés, Angela Nuria.** *Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos.* Alicante, España : Universidad de Alicante, 1993.
63. **European IPPC Bureau .** *Integrated Pollution Prevention and Control. Draft Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration.* Sevilla : Institute for Prospective Technological Studies, 2004.
64. **Universidad de Alcalá.** IV. Una aproximación al contexto social y territorial de la gestión de residuos. Aplicación a las instalaciones para tratamiento y almacenaje en la comunidad de Madrid IV.3. Las instalaciones de tratamiento. [En línea] [Citado el: 20 de 07 de 2009.] http://www.geogra.uah.es/web_aplicasisig/gest_residuos_PDF/IV.3.pdf.
65. **ALCYONE.** TIRU. [En línea] [Citado el: 26 de 07 de 2009.] <http://www.tiru.fr/>.
66. TIRU. [En línea] [Citado el: 26 de 07 de 2009.] <http://www.tiru.fr/spip.php?article375>.
67. The Earth Institute. Columbia University . *Solid waste management alternatives for the city of New York.* [En línea] 2005. [Citado el: 10 de 03 de 2009.] www.columbia.edu/cu/mpaenvironment/pages/projects/EDC%20Submission.pdf.
68. **Osada, Morihiro.** Direct melting system for MSW Recycling. Shaft Furnace Type Gasification and Melting System. . [En línea] Diciembre de 2002. [Citado el: 23 de 02 de 2009.] www.koetv.or.kr/incs/fileget.jsp?pn=7&fn=NSC+DMS+PAPER.doc .
69. **EBARA.** TwinRec Reference List. 2007. [En línea] 2007. [Citado el: 23 de 02 de 2009.] www.ebara.ch/_en_/icfg.php?n=1.
70. **Nguyen., R. B. Williams B. M. Jenkins D.** *A review and database of current and emerging technologies.* 2003.
71. **Selinger, Adrian y Steiner, Chritian.** *Waste Gasification in practice TwinRec Fluidized Bed gasification and ash melting review of four years of commercial plant operation.* Phoenix Arizona. : s.n., Mayo 2004.
72. **EBARA.** *Enviromental Engineering Company.* [En línea] 2007. [Citado el: 15 de 02 de 2009.] http://www.ebara.ch/_en_/twinrec.php?n=1.
73. **Westinghouse of Alter Nrg.** Waste processing. [En línea] [Citado el: 10 de 02 de 2009.] http://www.westinghouse-plasma.com/markets_applications/waste_processing.php.
74. **Plasco trail road inc.** *Semmi Annual Progress report.* 2008 .
75. **Plasco.** Technology Overview. [En línea] [Citado el: 03 de 02 de 2009 .] http://www.plascoenergygroup.com/?Technology_Overview..
76. *Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal.* **Malkow, Thomas.** 25, Petten : Elsevier, 25 de febrero de 2003, Waste Management.



77. *Yame Seibu Clean Center of Pyrolysis Gasification & Melting Process attained Four Years of Stable Operation.* **Yamamoto, Makoto.** 183, 2004, Mitsui Zosen Technical Review. 0026-6825.
78. **Recycling, Mitsui.** Pyrolysis Gasification & Melting Process. *R21 Projects Status as of May 20, 2003.* [En línea] http://www.ieabcc.nl/meetings/Tokyo_Joint_Meeting/02_Mitsui.pdf.
79. **Greater London Authority.** *City Solutions: new and emerging technologies for sustainable waste management.* Londres : Greater London Authority, 2003. http://www.london.gov.uk/mayor/environment/waste/wasteconfdocs/city_solutions_report.pdf.
80. **Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd.** *Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd Submission to Greater London Authority City Solutions Stakeholders on MSW Management.* Inglaterra : s.n., 2003.
81. **WasteGen.** *Pyrolysis Facility.* Alemania : s.n., 2004.
82. **ÖKOPROFIT.** *ÖKOPROFIT im Landkreis Günzburg.* Günzburg, Deutschland : ÖKOPROFIT, 2004. http://wirtschaft.landkreis-guenzburg.de/no_cache/oekoprofit.html?tx_z7lkce_pi1%5Bfilename%5D=969..
83. **Enel Unión Fenosa.** Plantas residuos. [En línea] http://www.eufer.es/index.php?ver_plantas=1&id_plantas=85&res_y=768&res_x=1366.
84. **Área de gobierno de medioambiente.** *Balance energético de la ciudad de Madrid.* Madrid : Gobierno de Madrid, 2006.
85. Power plants around the world. *Waste to energy plants in portugal and spain.* [En línea] 28 de Junio de 2008. <http://www.industcards.com/ppworld.htm>.
86. **Granatstein, D.L.** *Technoeconomic Assessment of Fluidized Bed Combustors as Municipal Solid waste incinerators: A summary of six case studies.* Canadá : Natural Resources Canada, 2001. http://www.ieabioenergytask36.org/Publications/1998-2001%20Task%2023/Case_Studies/A_Summary_of_Six_Case_Studies.PDF.
87. **AEVERSU.** Asociación Empresarial Valorización RSU. [En línea] 2009. <http://www.aeversu.com/>.
88. **TIRU.** [En línea] 2003. [Citado el: 12 de Mayo de 2009.] http://www.newlincs.com/tiru_group_ref_plants.pdf.
89. **Volker, Schulz.** Activated Lignite HOK(R) Helps Clean the Air in Paris. [En línea] 2009. [Citado el: 12 de 05 de 2009.] <http://www.prnewswire.co.uk/cgi/news/release?id=158818>.
90. **University of California.** *Evaluation of conversion Technology processes and products.* Conversion Technology Evaluation Report Appendices : s.n., 2004.
91. **EBARA.** ICFG Internally circulating fluidized bed gasifier. [En línea] 2003. [Citado el: 20 de 02 de 09.] http://www.ebara.ch/_en_/icfg.php?n=1.
92. **Westinghouse of Alter Nrg.** Waste processing. [En línea] 2007. [Citado el: 10 de 02 de 2009.] http://www.westinghouse-plasma.com/markets_applications/waste_processing.php.
93. **Plasco.** Technology Overview. [En línea] [Citado el: 03 de Febrero de 2009.] http://www.plascoenergygroup.com/?Technology_Overview..
94. **Plasco trail road inc.** *Semmi Annual Progress report.* Noviembre 2008.
95. **Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd.** Mitsui Recycling. [En línea] [Citado el: 31 de julio de 2009.] http://www.ieabcc.nl/meetings/Tokyo_Joint_Meeting/02_Mitsui.pdf.
96. *Environmental Report.* **Mitsui Engineering & Shipbuilding Co.** . Japón : s.n., 2001. pág. 13.



97. **GENIVAR, Rambol, Deloitte, URS.** *EFW Technology Overview*. Halton, Canada : s.n., 2007. http://www.region.halton.on.ca/ppw/waste/documents/EFW_Step1B_Technology.pdf.
98. **Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen.** *Müllverbrennung: Die thermische Behandlung von Abfällen*. München : Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 2002. [http://www.abfallratgeber-bayern.de/arba/allglfu.nsf/1F8A6340AB130BECC1256FB60035EDB7/\\$file/m%C3%BCllverb.pdf](http://www.abfallratgeber-bayern.de/arba/allglfu.nsf/1F8A6340AB130BECC1256FB60035EDB7/$file/m%C3%BCllverb.pdf).
99. *The potential of recycling and reusing municipal solid waste incinerator ash in Taiwan.* **Chin-Ming, Huang, y otros.** Taiwan : Waste Management , 2006, Vol. 26.
100. **Interstate waste Technologies.** [En línea] 2007. [Citado el: 10 de 02 de 09.] <http://iwtonline.com/about-us/index.html>.
101. *An Advanced Field Proven High Temperature Recycling Process.* **Thermoselect.** Genève, Switzerland : 6th world congress on integrated resources Management, 2002.
102. **Shimzu, Masuto, Miyoshi, Fumihiko y Yamada, Sumio.** Thermoselect waste gasification and reforming process Chiba. [En línea] Julio de 2004. [Citado el: 04 de 02 de 2009.] www.thermoselect.com/news/2004-07%20JFE%20Technical%20Report%20Thermoselect%20Process.pdf .
103. **Thermoselect.** *Chiba Technical Data*. 2004.
104. **URS.** *Conversion Technology evaluation Report APPENDICES*. Agosto 2005.
105. **Sander, Hans Joachim.** *Operating results of the BGL gasifier at Schwarze Pumpe*. San Francisco , California : s.n., 2003.
106. *Development Status of BGL Gasification.* **Kamka, Frank, Jochmann, Andreas y Picard, Lutz.** Freiberg, Alemania : International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies, 2005.
107. **Sumitomo/Ku.** Refuse Gasification and Melting Plant. [En línea] [Citado el: 02 de 10 de 2009.] http://www.gec.jp/JSIM_DATA/WASTE/WASTE_3/html/Doc_445.htm.
108. **Sato, Hisaaki.** *High-temperature Winkler gasification of municipal solid waste*. s.l. : Sumitomo Heavy Industries.
109. *High-temperature Winkler gasification of municipal solid waste.* **Wolfgang, Adlhoch, Sato, Hisaaki y Wolff, Joachim.** San Francisco California : s.n., 2000.
110. **Nippon Steel Engineering.** . *Reference list of direct Melting System, Facilities in operation*.
111. **Demographia.** Ranking de ciudades mas pobladas del mundo. [En línea] Abril de 2009. [Citado el: 15 de Octubre de 2009.] <http://www.demographia.com/db-worldua2015.pdf>.
112. **Coordinación de uso eficiente de energía.** *Plan de acción para el ahorro y uso eficiente de energía en el Distrito Federal*. s.l. : Jefatura de gobierno del Distrito Federal, 2009.
113. **INEGI.** Compendio de estadísticas ambientales 2008. *Generación de residuos sólidos urbanos por Entidad Federativa*. [En línea] 2009. [Citado el: 20 de Marzo de 2009.] http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/compendio2008/10.100.8.236_8080/ibi_apps/WFServlet8681.html.
114. —. Generación per cápita diaria y anual de residuos sólidos urbanos por zona geográfica, 1998 a 2006. [En línea] [Citado el: 22 de Marzo de 2009.] <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mamb126&s=est&c=6123>.