



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

**PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE
GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE
ENERGÍA**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
Maestro en Ingeniería
Campo del Conocimiento: Ingeniería Ambiental**

PRESENTA:
Adriana Rocío Velasco Cancino

TUTOR:
Dr. Alfonso Durán Moreno



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.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 3 de 100	

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dra. María Teresa Orta Ledesma
 Secretario: M. en C. Constantino Gutiérrez Palacios
 Vocal: Dr. Alfonso Durán Moreno
 1^{er} Suplente: M. A. I. Landy Irene Ramírez Burgos
 2^o Suplente: M. en I. Carlos Villanueva Moreno

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

UNAM, FACULTAD DE QUÍMICA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
 Paseo de la Investigación Científica, Conj. E,
 Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F. Tel.: (55) 56225293
 Sede alterna: Torre de Ingeniería de la UNAM.

TUTOR DE TESIS

Dr. Alfonso Durán Moreno

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 4 de 100	

AGRADECIMIENTOS

Reconocimiento

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca en la mayor parte de la realización de este trabajo (Becario No. 332344)

Al Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Distrito Federal por los recursos del Proyecto DF-2008-C01-94261

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 5 de 100	

Índice de Contenido

1. RESUMEN.....	9
2. ABSTRACT	10
3. INTRODUCCIÓN.....	11
3.1 JUSTIFICACIÓN	12
3.2 OBJETIVO GENERAL	13
3.3 OBJETIVOS PARTICULARES.....	13
3.4 ALCANCES.....	14
4. ANTECEDENTES	15
4.1 PROBLEMÁTICA DE MANEJO DE LOS RSU EN EL CASO DE ESTUDIO	15
4.2 GASIFICACIÓN COMO ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN.....	18
4.3 MODELOS DE SISTEMAS DE GASIFICACIÓN.	21
4.4 MARCO LEGAL.....	22
4.4.1 <i>Marco Legal en Materia de Energía</i>	<i>22</i>
4.4.2 <i>Marco Legal en Materia Ambiental.....</i>	<i>23</i>
4.4.3 <i>Marco Legal a Nivel Internacional.....</i>	<i>25</i>
5. MARCO TEÓRICO.....	26
5.1.1 <i>Gasificación Convencional</i>	<i>28</i>
5.1.2 <i>Gasificación por plasma.....</i>	<i>33</i>
5.1.3 <i>Tecnologías Comerciales de Gasificación de RSU.....</i>	<i>34</i>
5.1.4 <i>Criterios de Diseño de un Gasificador</i>	<i>42</i>
6. METODOLOGÍA	49
7. RESULTADOS.....	55
7.1 MUESTREO PUNTUAL Y CARACTERIZACIÓN DE RSU DEL CASO DE ESTUDIO.....	55
7.1.1 <i>Características Físicas.....</i>	<i>56</i>
7.1.2 <i>Características Químicas</i>	<i>58</i>
7.2 DISEÑO DEL PROCESO DEL CASO DE ESTUDIO.....	64
7.2.1 <i>Sistema de Tratamiento Previo para el Caso de Estudio</i>	<i>64</i>
7.2.1 <i>Sistema de Gasificación del Caso de Estudio</i>	<i>70</i>
7.2.2 <i>Simulación del Proceso de Gasificación en Aspen Plus®</i>	<i>70</i>
7.2.3 <i>Limpieza del Gas de Síntesis del Caso de Estudio</i>	<i>79</i>
7.3 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	84
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
9. BIBLIOGRAFÍA	88
10. ANEXOS	96
ANEXO A – RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS POR ESTACIÓN DE TRANSFERENCIA	96

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 6 de 100	

ANEXO B - Costos 99

Índice de Figuras

FIGURA 1. FLUJO DE LOS RSU DEL DISTRITO FEDERAL EN TONELADAS/DÍA (GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL 2010). 18

FIGURA 2. DIAGRAMA DE UN EJEMPLO DE PROCESO DE GASIFICACIÓN CONVENCIONAL DE RSU. 28

FIGURA 3. ESQUEMA DE GASIFICADOR CON FLUJO DE ARRASTRE (HIGMAN 2003). 29

FIGURA 4. ESQUEMA DE REACTOR DE PLASMA (LINGHONG 2010). 33

FIGURA 5. DIAGRAMA DE PROCESO DE RSU CON GASIFICACIÓN POR ARCO DE PLASMA. 34

FIGURA 6. DIAGRAMA DE TECNOLOGÍAS DE GASIFICACIÓN DE RSU DE ESCALA MEDIANA A GRANDE (JUNIPER 2001) 35

FIGURA 7. DIAGRAMA DEL PROCESO THERMOSELECT (THERMOSELECT 2011). 37

FIGURA 8. DIAGRAMA DEL PROCESO DE NIPPON STEEL (NIPPON STEEL 2005). 38

FIGURA 9. DIAGRAMA DEL PROCESO EBARA. (URBASER, S. A. 2009) 39

FIGURA 10. DIAGRAMA DEL PROCESO SUMITOMO (UHDE THYSSENKRUPP 2007) 40

FIGURA 11. DIAGRAMA DEL PROCESO INENTEC (QUAPP 2002) 41

FIGURA 12. COMPOSICIÓN DE GAS DE SÍNTESIS A DIFERENTES TEMPERATURAS (MAOYUN 2009). 43

FIGURA 13. COMPOSICIÓN DE GAS DE SÍNTESIS A TEMPERATURAS MAYORES A 1,000 °C. (HIGMAN 2003) 44

FIGURA 14. GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO CIRCULANTE (SUNGGYU LEE 2007). 48

FIGURA 15. DIAGRAMA DE METODOLOGÍA DE LA TESIS. 49

FIGURA 16. CARACTERIZACIÓN DE RSU DE LAS ESTACIONES DE TRANSFERENCIA DEL DISTRITO FEDERAL. 51

FIGURA 17. FOTOGRAFÍA DEL CALORÍMETRO DSC-1. 52

FIGURA 18. TERMOGRAMA DE LA COMBUSTIÓN DE UNA MUESTRA DE CARTÓN. 53

FIGURA 19. FOTOGRAFÍA DE LA DETERMINACIÓN DE SUBPRODUCTOS EN LA ESTACIÓN DE TRANSFERENCIA TLALPAN. 55

FIGURA 20. TERMOGRAMAS SOBREPUESTOS DE LA MUESTRA 8 DE LA ESTACIÓN DE TRANSFERENCIA MIGUEL HIDALGO. 61

FIGURA 21. DIAGRAMA DEL TRATAMIENTO PREVIO 68

FIGURA 22. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL TRATAMIENTO PREVIO 69

FIGURA 23. DIAGRAMA DE SIMULACIÓN EN ASPEN PLUS® 72

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 7 de 100	

FIGURA 24. GRÁFICAS DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TEMPERATURA DE OPERACIÓN DEL REACTOR GASIFICADOR DE RSU 74

FIGURA 25. GRÁFICAS DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RELACIÓN DE FLUJOS OXÍGENO-ALIMENTACIÓN DE OPERACIÓN DEL REACTOR GASIFICADOR DE RSU 75

FIGURA 26. GRÁFICAS DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RELACIÓN DE FLUJOS VAPOR-ALIMENTACIÓN DE OPERACIÓN DEL REACTOR GASIFICADOR DE RSU..... 76

FIGURA 27. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DEL REACTOR GASIFICADOR DE RSU DEL CASO DE ESTUDIO 77

FIGURA 28. DIAGRAMA DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN Y LIMPIEZA DE GAS DE SÍNTESIS..... 81

FIGURA 29. DIAGRAMA DE BLOQUES DE BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE LA LIMPIEZA DE GAS DE SÍNTESIS..... 82

Índice de Tablas

TABLA 1. GENERACIÓN DE RSU PER CÁPITA EN EL PAÍS (SEMARNAT, 2008)..... 11

TABLA 2. COMPOSICIÓN DE LOS RSU GENERADOS EN EL DISTRITO FEDERAL (GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL 2010)..... 16

TABLA 3. EJEMPLOS CASOS DE ÉXITO DE PLANTAS INSTALADAS CON GASIFICACIÓN DE RSU..... 21

TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE GASIFICADORES DE LECHO FIJO (WORLD BANK 1999). 30

TABLA 5. DESCRIPCIÓN DE GASIFICADORES DE LECHO FLUIDIZADO. (WORLD BANK 1999)..... 32

TABLA 6. PROVEEDORES DE REACTORES DE GASIFICACIÓN (CHEREMISINOFF 2005). 32

TABLA 7. COMPOSICIONES TÍPICAS DE GAS DE SÍNTESIS PROVENIENTE DE GASIFICACIÓN..... 44

TABLA 8. CRITERIOS TÉCNICOS DE DISEÑO DE UN GASIFICADOR DE RESIDUOS SÓLIDOS. 45

TABLA 9. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE LOS GASIFICADORES DE LECHO FLUIDIZADO CIRCULANTE. 47

TABLA 10. COMPOSICIÓN EN % PESO DE SUBPRODUCTOS (GARCÉS 2010). 57

TABLA 11. PESO VOLUMÉTRICO Y HUMEDAD DE LOS RSU DE LAS ESTACIONES DE TRANSFERENCIA DEL DISTRITO FEDERAL (GARCÉS 2010)..... 58

TABLA 12. CONTENIDO DE CENIZAS EN % PESO Y ANÁLISIS ELEMENTAL EN % PESO DE LOS RSU DE LAS ESTACIONES DE TRANSFERENCIA DEL DISTRITO FEDERAL (GARCÉS 2010)..... 59

TABLA 13. ANÁLISIS DE CALOR DE COMBUSTIÓN DE LOS RSU DE LAS ESTACIONES DE TRANSFERENCIA DEL DISTRITO FEDERAL. 60

TABLA 14. CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO DE LOS RSU DE LAS ESTACIONES DE TRANSFERENCIA DEL DISTRITO FEDERAL. 62

TABLA 15. CARACTERIZACIÓN DE METALES PESADOS EN MG/KG_{RSU}. 63

TABLA 16. EQUIPOS DE LA PRIMERA ETAPA DE TRATAMIENTO DE LOS RSU. 66

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 8 de 100	

TABLA 17. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA SEGUNDA ETAPA DE TRATAMIENTO PREVIO. 67

TABLA 18. LISTA DE EQUIPOS DEL TRATAMIENTO PREVIO..... 68

TABLA 19. TABLA DE BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA..... 69

TABLA 20. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO CIRCULANTE..... 77

TABLA 21. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE REACTOR GASIFICADOR DE RSU DEL CASO DE ESTUDIO. 78

TABLA 22. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE LIMPIEZA DE GAS DE SÍNTESIS. 80

TABLA 23. LISTA DE EQUIPOS DE SISTEMA DE GASIFICACIÓN Y LIMPIEZA DE GAS DE SÍNTESIS..... 81

TABLA 24. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE GAS DE SÍNTESIS 82

TABLA A.1 COMPOSICIÓN DE LOS RSU (% PESO) POR ESTACIÓN DE TRANSFERENCIA (ET) 96

TABLA A.2 LISTA DE ESTACIONES DE TRANSFERENCIA (ET). 98

TABLA B.1. COMPONENTES DEL COSTO TOTAL DE LA PLANTA (YASSIN 2009) 100

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 9 de 100	

1. RESUMEN

Los residuos sólidos urbanos (RSU) de los centros poblacionales requieren de un manejo adecuado. En cada paso del manejo se deben procurar las mejores prácticas técnicas, la valorización del material y el marco normativo. El manejo de los RSU consta de la generación, recolección, transporte, tratamiento, valorización y disposición final. Este proyecto se centra en el estudio de la valorización de los RSU por medio de una de las alternativas de tratamiento térmico. El tratamiento térmico de residuos se puede utilizar de forma combinada para dar como resultado un manejo integral a los RSU generados por la población. En este documento se encuentra una descripción de la gasificación de RSU y un modelo del fenómeno a través de un caso de estudio. La gasificación es un tratamiento que se puede aplicar a residuos con alto contenido de carbón o a combustibles derivados de residuos (CDR). El caso de estudio es la valorización de los RSU del Distrito Federal (DF) manejados en las 13 estaciones de transferencia de la ciudad. La metodología se resume en el apoyo al muestreo puntual de los RSU en cada estación de transferencia y caracterización de los RSU en sus aspectos físicos y químicos. Dentro de esta caracterización se obtuvo que los RSU que se manejan en las estaciones de transferencia tienen un poder calorífico adecuado para la aplicación de la tecnología de gasificación. Posteriormente, se diseñó un proceso de tratamiento previo para la gasificación de un flujo de 550 toneladas/día de los RSU del DF. El tratamiento previo incluye la remoción de materiales de reúso o reciclables con el objetivo de aplicar conjuntamente otras estrategias de manejo de RSU. De igual forma, el tratamiento previo incluye la producción de CDR por medio de la trituración y secado de los RSU. El modelo de gasificación es del tipo de caja negra por medio del simulador de procesos ASPEN Plus® con el que se estima la composición y la cantidad de gas de síntesis que se puede obtener con un gasificador de lecho fluidizado circulante de los CDR del caso de estudio. Con las características de gas de síntesis producido se propone un sistema de limpieza de gas de síntesis y un sistema de generación de energía eléctrica. Con esta información se concluye que es conveniente profundizar el estudio de esta alternativa de valorización de RSU.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 10 de 100	

2. ABSTRACT

The generation of municipal solid waste (MSW) requires proper handling. Each stage of the MSW management should be oriented to its recovery, the use of the best technical available practices and the regulation framework compliance.

The MSW management consists in generation, collection, transport, recovery, treatment and disposal. This research is focused on the study of the MSW valorization through thermal treatment alternatives. The MSW thermal treatment can be used in combination with other techniques to achieve a MSW sound management. In this revision, it is included a description of the gasification process and its model through one case of study. This thermal treatment requires high carbon content at the feeding or refused derived fuel (RDF). The case of study are MSW from Mexico City, which are handled in 13 transfer stations. The methodology included the support to the sampling campaign and characterization of the MSW in each transfer station. This characterization was performed for both, chemical and physical properties. It is important to point out that in this characterization it was found that the MSW from Mexico City is suitable for gasification due to its energy content. A previous treatment was proposed for 550 tonnes/day of MSW from Mexico City's transfer stations. This previous treatment is divided in two parts; in the first one, other such as the withdrawal of reusable and recyclable material are proposed. The second part consists of RDF production through the MSW shredding and drying. The gasification model is a black box type model with a process simulator called ASPEN Plus®. This model estimates the composition and the syngas quantity obtained with a circulating fluidized bed gasifier. Once the syngas characteristics were obtained, it was proposed a syngas cleaning process and an electric generation system. It is important to point out that deeper studies of this alternative of MSW treatment are essential to find a sound MSW management.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 11 de 100	

3. INTRODUCCIÓN

La prioridad del trabajo en el área ambiental es ayudar a la humanidad a encontrar la manera de vivir sustentablemente. Los millones de personas que habitan el planeta necesitan agua, energía, comida, vivienda y aire limpio. Es necesario aprovechar los recursos naturales para satisfacer estas necesidades sin arriesgar los ciclos básicos de los que depende la vida. El ritmo de desarrollo de la sociedad actual se ha caracterizado por un creciente consumo de bienes y servicios para una población cada vez más numerosa. Una consecuencia de este patrón de comportamiento es la generación de RSU. Se estima que en 2006 la cantidad de RSU generada a nivel mundial fue de 2, 020, 000,000 toneladas (UNEP 2009). En 2006 se estimó que en México se generó una cantidad equivalente a 36, 135,000 toneladas de RSU (INEGI 2011). A lo largo del país, existen diferencias importantes en la cantidad de RSU generados debido al tipo de recursos disponibles, factores culturales, niveles de ingreso y a la dinámica del movimiento hacia los centros urbanos. Como se puede apreciar en la siguiente tabla, la región que produce más cantidad de RSU es el Distrito Federal.

Tabla 1. Generación de RSU per cápita en el país (SEMARNAT, 2008).

Región	Generación de RSU per cápita (kg/día)
Frontera Norte	1.1
Sur	0.7
Norte	0.8
<i>Distrito Federal</i>	<i>1.4</i>
Centro	0.9

El caso de estudio de este trabajo es los RSU del Distrito Federal que se manejan en las trece estaciones de transferencia. La cantidad de RSU generados en el DF fue de 4, 563,000 toneladas de RSU en el 2005 (INEGI 2008). Esta cantidad representa aproximadamente el 13 % del total nacional y si se compara con la generación estimada mundialmente, la cantidad del DF representa el 0.2% del total.

El manejo de RSU en el Distrito Federal cuenta con estaciones de transferencia, plantas de selección de material de reciclaje, plantas de composta y un relleno sanitario.

Como se puede observar, el Distrito Federal tiene una infraestructura importante para el manejo de los RSU. Sin embargo, en los últimos años no ha sido la ciudad líder a nivel nacional. A lo largo del país, se pueden encontrar ciudades con experiencias exitosas en todas las etapas del manejo de los RSU y en especial en su aprovechamiento y disposición

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 12 de 100	

final: un ejemplo es la ciudad de Monterrey, Nuevo León. En Monterrey se cuenta con el Sistema Integral para Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos (SIMEPRODE), el cual se encarga de la disposición final de RSU por medio de un relleno sanitario, una planta clasificadora, una planta generadora de energía por biogás y una planta trituradora de llantas (SIMEPRODE 2009).

El reto para el Distrito Federal es muy importante y se debe enfocar en la reducción de la generación de RSU y en dedicar más recursos económicos al manejo de los RSU. Una mega ciudad puede resolver la disposición de sus RSU en rellenos sanitarios. Sin embargo, por la falta de espacio estos son cada vez más lejanos y con probables conflictos sociales por afectación a comunidades cercanas, por lo que una solución adecuada es desarrollar las diferentes alternativas de manejo.

El manejo integral de los RSU se logra aplicando varias estrategias de manejo las cuales son reducción en fuente, reciclado, composta, tratamiento térmico con recuperación de energía, relleno sanitario e incineración sin recuperación de energía (EPA 2009). El Gobierno del Distrito Federal ha considerado la combinación de ellas a través de Centros Integrales de Reciclado y Energía (CIREs), en los cuales se incluye el tratamiento térmico con recuperación de energía (Gobierno del Distrito Federal 2010). Las experiencias exitosas de sistemas de gasificación de RSU acoplados a producción de energía eléctrica se presentan en Alemania y Noruega (ENERGOS 2010). Con base en los reportes sobre la experiencia internacional en la valorización de los RSU, se puede afirmar que la gasificación es una alternativa que se debe explorar para el caso del Distrito Federal.

3.1 Justificación

Este estudio tiene como justificación la realización de un análisis del proceso de la gasificación aplicado al caso de estudio de los RSU del Distrito Federal por medio de la herramienta de simulación de procesos Aspen Plus, la cual se ha utilizado para el análisis de gasificación de carbón, residuos de biomasa y RSU (Chen 2011). Por otro lado proporciona las bases técnicas que sustenten la alternativa de tratamiento térmico por gasificación como parte de las estrategias de manejo integral de los RSU. Se eligió el caso de estudio del Distrito Federal por la cantidad y características de estos residuos que los hace susceptibles a una valorización con un tratamiento de gasificación. En el Distrito Federal existe una corriente de residuos mezclados de 9,017 toneladas/día que llegan al relleno sanitario Bordo Poniente que provienen directamente de las estaciones de transferencia. Esta corriente de residuos es la que debe ser el objetivo de tecnologías de

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 13 de 100	

tratamiento ya que actualmente un bajo porcentaje tiene como destino el reciclaje de materiales (6%), así como la generación de composta (1%); el destino principal de estos residuos es el relleno sanitario Bordo Poniente (93%). La problemática del manejo de RSU en el Distrito Federal es crítica debido a que se genera una gran cantidad de RSU y a que el área disponible para disposición es limitada, por lo que estudios de las alternativas de tratamiento y valorización son importantes (Gobierno del Distrito Federal 2010).

3.2 Objetivo General

Proponer conceptualmente un sistema de gasificación de residuos sólidos urbanos integrado a un sistema de generación de energía eléctrica aplicado al caso de estudio de los residuos sólidos urbanos del Distrito Federal.

3.3 Objetivos Particulares

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Establecer el estado del arte sobre tecnologías de sistemas de gasificación de RSU.
- Simular las condiciones de operación de la gasificación de RSU con el uso del software Aspen Plus[®], con el fin de estimar la cantidad que se puede generar de gas de síntesis y su composición
- Seleccionar un sistema de generación de energía eléctrica a partir de gas de síntesis y estimar la producción de energía eléctrica.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 14 de 100	

3.4 Alcances

Los alcances del trabajo de investigación se listan a continuación:

- Establecer modelo de un sistema de gasificación de lecho fluidizado circulante con las características de los RSU del caso de estudio
- Realizar balance de materia y energía del sistema de gasificación con ayuda de la herramienta de simulación de procesos.
- Elegir sistema de energía eléctrica con base en criterios técnicos de eficiencia eléctrica.
- Proponer a nivel conceptual un sistema de valoración de RSU aplicado al caso de estudio de los RSU del Distrito Federal integrado a un sistema de generación de energía eléctrica.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 15 de 100	

4. ANTECEDENTES

En este capítulo se discute la información acerca de la problemática de disposición de los RSU en el caso de estudio del Distrito Federal, también se hace una revisión del marco legal para el manejo de RSU del DF y se detalla la gasificación como alternativa de disposición de residuos y por último se presenta la experiencia encontrada en literatura acerca del diseño de sistemas de gasificación.

4.1 Problemática de manejo de los RSU en el Caso de Estudio

El Distrito Federal se encuentra ubicado en la región centro de la República Mexicana y su territorio colinda al norte, este y oeste con el estado de México y al sur con el estado de Morelos. 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. El Distrito Federal tiene 8.85 millones de personas que viven en un área total 1,505 km² (INEGI 2010). La cantidad de RSU generada es de 12,439 toneladas por día. La tasa de generación promedio del Distrito Federal es de 1.34 kg/d por habitante y los datos de composición de los RSU en la generación se observan en la siguiente tabla (Gobierno del Distrito Federal 2010).

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 16 de 100

Tabla 2. Composición de los RSU generados en el Distrito Federal (Gobierno del Distrito Federal 2010).

Categoría	% promedio	Categoría	% promedio
Algodón	0.3	Cobre	0.02
Cartón liso	3.09	Pilas eléctricas	0.07
Cartón corrugado	2.77	Acero inoxidable	0.02
Otros Cartones	0.5	Papel Bond	2.09
Tetrapak	1.51	Periódico	1.68
Cuero	0.33	Revista	0.63
Residuo Fino	2.68	Papel higiénico	6.72
Residuo grueso	1.71	Pañal desechable/toallas femeninas	2.83
Fibra dura vegetal	0.5	PET	2.8
Fibra sintética	0.49	HDPE-PEAD	2.92
Hueso	0.7	PVC	0.15
Llantas de automóvil	0.48	LDPE PEBD polietileno baja densidad	5.44
Llantas de camioneta	0.06	Polipropileno	0.92
Llantas de camión	0.37	Poliestireno	0.98
Otros hules	0.17	Alimenticios	34.87
Lata aluminio	0.27	Residuos jardinería	9.18
Lata metálica	1.46	Trapo	2.94
Loza y cerámica	0.53	Vidrio Transparente	1.74
Madera	1.95	Vidrio de color	0.74
Material construcción	1.75	Tenis	0.2
Material ferroso	0.37	Zapatos	0.44
Aluminio	0.07	Alfombra	0
Bronce	0.03	Cera	0
Fibra de vidrio	0.43	Chácharas	0
Colchón	0	Muebles	0
Electrónicos	0.11		

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 17 de 100	

Entre los RSU que se generan en las delegaciones existe una proporción generada por particulares que se entrega directamente a estaciones de transferencia o al relleno sanitario con previo pago a la tesorería. El resto de RSU provenientes de otras fuentes es recolectado por medio de los servicios de barrido y recolección en los domicilios, comercios e industria. Este servicio se brinda a través de las delegaciones, empresas privadas, y la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU). Estos residuos se entregan en las estaciones de transferencia y la DGSU se encarga de transportarlos al relleno sanitario o a las plantas de selección y de composta. El 55% de los camiones recolectores son de carga trasera y el método de recolección de parada fija es el más común. La prepepeña de los RSU se presenta después de la recolección y se realiza informalmente por personas voluntarias de todas las edades. Los servicios de barrido y recolección entregan los RSU a estaciones de transferencias, a plantas de selección y de composta también. Existen 13 estaciones de transferencia situadas en las siguientes delegaciones: Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Central de Abasto, Coyoacán, Cuajimalpa, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero (G.A.M.), Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco.

Los RSU se trasladan en camiones de 25 toneladas de las 13 estaciones a plantas de selección y a la planta de composta de Bordo Poniente. Existen nueve plantas de Composta en el Distrito Federal. Las plantas de selección son Santa Catarina, San Juan de Aragón y Bordo Poniente, su eficiencia es de aproximadamente 7.7% (SMA 2007). El material de rechazo de las plantas de selección se envía a disposición final en el relleno sanitario.

El relleno sanitario donde se depositan los RSU generados en el Distrito Federal y de algunos municipios del Estado de México se denomina Bordo Poniente. Este relleno se encuentra ubicado en el territorio del Lago de Texcoco, en terrenos que son propiedad de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Inició operaciones en 1985 y se dividió en etapas de la I a la IV, la operación de las etapas I a la III finalizó en 1993. La etapa IV cuenta con geomembrana, una planta de tratamiento de lixiviados, y pozos de monitoreo.

El Programa de Gestión Integral de RSU del Distrito Federal (PGRSUDF) señala que a finales de 2010 se disminuiría la cantidad de residuos enviados al relleno sanitario y para el 2011 se debe encontrar un nuevo sitio para la construcción de otro relleno sanitario. En este Programa se indica que se promoverá la investigación entre las instituciones académicas la investigación científica y tecnológica para aprovechar y valorizar los RSU y los residuos de manejo especial. La siguiente figura es el diagrama de flujo de los RSU en el Distrito Federal publicado en el PGRSUDF (Gobierno del Distrito Federal 2010), se observa que la suma de la cantidad de residuos que se generan no coincide con la cifra de generación reportada por el gobierno de 12,439 toneladas/día. Como se puede observar

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 18 de 100	

en la figura 1, existe una corriente muy grande sin valorizar que simplemente se transporta al relleno sanitario.

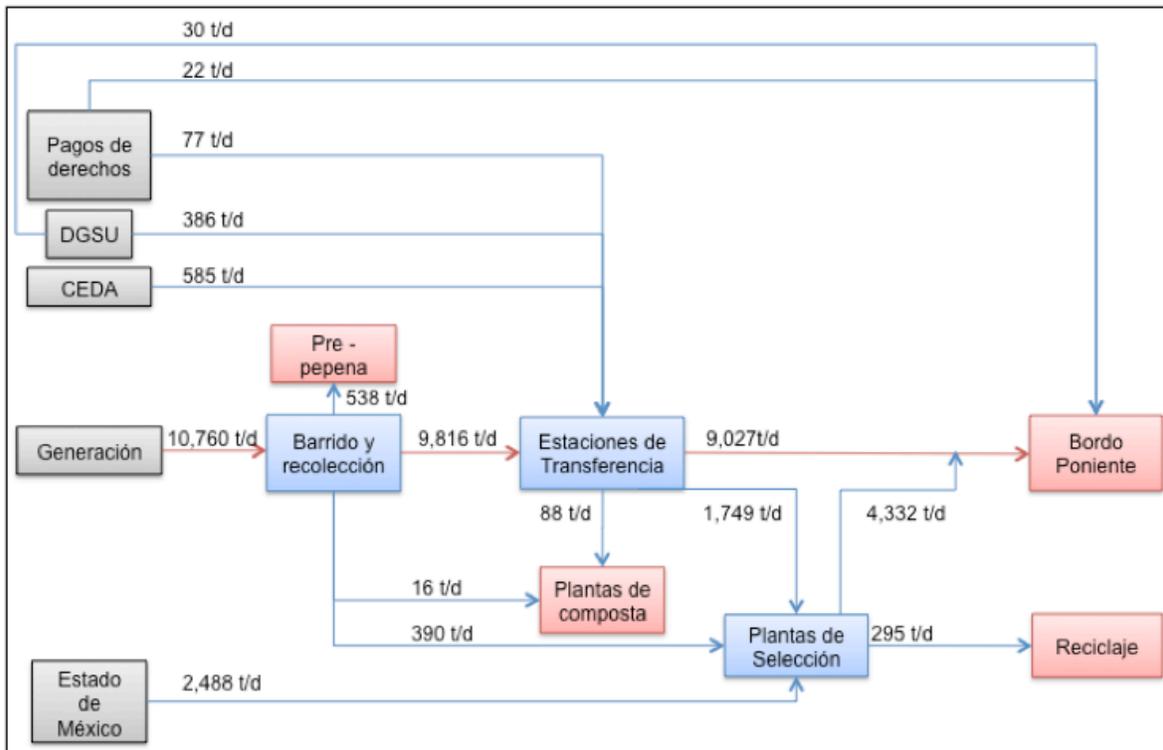


Figura 1. Flujo de los RSU del Distrito Federal en toneladas/día (Gobierno del Distrito Federal 2010).

4.2 Gasificación como alternativa de disposición

El término gasificación se refiere a la conversión de cualquier combustible con contenido de carbono en un producto con poder calorífico significativo por medio de oxidación parcial. La primera planta de manufactura de gas de síntesis de carbón fue construida en

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 19 de 100	

la ciudad de Baltimore, Estados Unidos en 1816. La aplicación de la gasificación era la producción de combustible gas para la iluminar las calles de las grandes ciudades. El uso de carbón para producir gas para calentamiento de hogares e iluminación llegó a su fin con el descubrimiento de cantidades enormes de gas natural. El interés en tecnologías de gasificación se renovó entre 1960 y 1970 debido a las controversiales proyecciones que sugerían que las reservas de gas estarían agotadas para 1990. La década de los ochenta fue dirigida a reconocer los beneficios de la tecnología de gasificación. Para el 2005 existían más de 150 compañías en el mundo que comercializaban sistemas basados en sistemas de gasificación (Cheremisinoff 2005).

Existen instalaciones de gasificación para biomasa, carbón y RSU. A continuación se listan las ventajas de la tecnología de gasificación de RSU:

- Produce un gas con características de combustible que puede ser usado para la generación de electricidad, calor o como materia prima para la manufactura de productos químicos.
- Reduce el volumen y la masa de los RSU alimentados para su disposición final.
- Concentración e inmovilización de componentes inorgánicos
- Emite menores concentraciones de partículas, de óxidos de nitrógeno y de azufre, debido a la limpieza del gas de síntesis.
- Presenta una barrera para la formación de dioxinas y furanos debido a las siguientes razones: alta temperatura y la falta de oxígeno en el ambiente reductor del gasificador previene la formación de cloro libre del ácido clorhídrico y limita la reacción del cloro con los precursores.

Las desventajas de este tratamiento son:

- Implica altos costos de inversión y operación por su bajo nivel de comercialización (Arjan 2011).
- Requiere una fuente de energía adicional para generar calor e iniciar el proceso.
- Requiere un tratamiento previo de la alimentación para asegurar buena calidad del gas de síntesis.

Según el Banco Mundial, la gasificación es una tecnología avanzada de tratamiento de RSU que está muy bien establecida para alimentaciones como biomasa y carbón pero existe poca experiencia en RSU y en los diferentes procesos que existen no está optimizada la

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 20 de 100	

producción de energía y no se encuentra diseñada para RSU sin separación previa (World Bank 2008).

Existe un estudio de análisis de ciclo de vida de ocho tecnologías para residuos de Singapore en el cual se evaluaron la pirolisis-gasificación de RSU, la pirolisis de RSU, gasificación con craqueo térmico de RSU, pirolisis combinada, gasificación y oxidación de RSU, gasificación con vapor de madera, gasificación con reactor de lecho fluidizado de residuos orgánicos, gasificación de RSU tratado y gasificación de llantas. En este análisis se determinaron los impactos ambientales de estos sistemas de conversión que incluyeron potencial de calentamiento global, potencial de acidificación del suelo y formación de ozono fotoquímico por medio de los inventarios de emisiones del lugar, entre otros. Como resultado se obtuvo que las tecnologías con menos impacto fueron la gasificación con vapor de madera y la gasificación con lecho fluidizado de residuos orgánicos (Hsien 2009). De igual forma, en la literatura se reporta la gasificación con energía solar, la cual se refiere al uso de energía solar en las partes en que el proceso es endotérmico (Nirmal 2009). La gasificación de RSU es una tecnología cuya factibilidad debe ser evaluada considerando aspectos técnicos, ambientales y sociales.

La planta de demostración Lahden Lampvoima Oy de Foster Wheeler se encuentra ubicada en Lahti, Finlandia e inició operación comercial en marzo de 1998. La planta usa biomasa, llantas triturada y plásticos; cuenta con un gasificador de lecho fluidizado circulante conectado a un boiler. Su alimentación contiene de 20-50% de humedad (Cheremisinoff 2005).

Entre las plantas existentes de gasificación de carbón se encuentran la estación de energía Global Energy's Wabash River en Indiana que inició servicio de demostración en 1995 y servicio comercial en 2001 con un gasificador Conoco Phillips, produce energía eléctrica (262 MW) por medio de un ciclo combinado. La estación eléctrica Tampa Electric's Polk inició demostración en 1996 y servicio comercial en 2001 con un gasificador Texaco, produce 250 MW de electricidad en un ciclo combinado (Clean-energy us 2009).

Existen varias tecnologías de gasificación aplicables a RSU, como se aprecia en la siguiente tabla. Otros ejemplos de estas tecnología son el proceso Thermoselect, proceso Compact Power, proceso SVZ, proceso WGT, tecnología BCL/Ferco, y proceso Krupp-Uhde PreCon (Malkow 2003). También existen casos no exitosos como la planta de Thermoselect ubicada en Karlsruhe Alemania.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 21 de 100	

Tabla 3. Ejemplos casos de éxito de plantas instaladas con gasificación de RSU.

Nombre de la tecnología	ENERGOS (ENERGOS 2010)	The Alstom power TwinRec System (EBARA 2007)	Plasco Energy Group (Plasco Energy Group 2005)
Nombre de la planta	Isle of Wright plant	Kawaguchi City Asahi, Environmental Center	Planta Piloto
Ubicación (Ciudad, país)	Inglaterra	Kawaguchi, Japón	Ottawa, Canadá
Periodo de operación (año)	2009	2002	Demostración
Capacidad instalada (t/d)	83	420	86
Equipos principales de generación eléctrica	Caldera de vapor	Turbinas de vapor	Motor de combustión
Potencia eléctrica instalada	1.8MW	N/D	3.3MW

En la experiencia de México al respecto, se tiene un reactor de plasma frío con la tecnología de Adaptive ARC, sin embargo no se encuentra en operación debido a que no cuenta con todas las autorizaciones requeridas (Bio-Sistemas Sustentables sapi de CV 8). La empresa TSS International hizo pruebas en 2006 con un reactor de plasma sin concretar la operación. De igual forma, la UNAM cuenta con un laboratorio de gasificación de biomasa del Instituto de Ingeniería.

4.3 Modelos de sistemas de gasificación.

En esta sección se describen los estudios acerca del diseño de sistemas de gasificación disponibles en la literatura, los cuales se basan en la modelación matemática y experimentos de gasificación de carbón, biomasa y residuos sólidos urbanos. La modelación matemática consiste en describir un fenómeno por medio de ecuaciones, existen varios tipos de modelado de gasificadores tales como el modelo dinámico con

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 22 de 100	

ecuaciones de momento resueltas, el modelo de fluidización que consideran dos fases, ecuaciones de momento no resueltas y relaciones empíricas para describir el flujo y por último, los modelos de caja negra donde se consideran balances de materia y energía globales (Gómez-Barea 2010). Al respecto, se encuentra disponible el trabajo de modelación del equilibrio en dos etapas con el objetivo de estimar la conversión de carbón en sistemas reales de gasificación de carbón y predecir la composición final con variaciones en condiciones de operación (Hiroki 2008).

En el caso de la gasificación de RSU existen reportes tales como la simulación para predecir la composición del gas (Chen 2010). También se puede encontrar la modelación de co-gasificación de RSU con lignita con una modelación del programa ASPEN Plus (Koukouzas 2008). Otros antecedentes en cuanto a la simulación de la gasificación con ASPEN Plus se ha usado para alimentaciones con biomasa tales como cáscara de arroz y aserrín de pino para la predicción los resultados de gasificación a escala. En estas simulaciones se obtiene y se optimiza la composición y conversión de carbón (Mehrdokht 2008) (Puig-Arnavat 2010).

Los estudios de descripción del proceso de gasificación con pruebas experimentales se han realizado en diferentes tipos de gasificadores tales como camas fijas, lechos fluidizados y hornos de plasma. Un ejemplo de estos estudios es el monitoreo de las composiciones del gas de síntesis en la gasificación experimental de papel y cartón con CO₂ como agente gasificante (Ahmed 2009). Otros trabajos manejan la gasificación de residuos sólidos urbanos y el efecto en la composición del gas de síntesis de la variación de las condiciones de operación, tales como temperatura, agente gasificante y catalizador (Maoyun 2009).

4.4 Marco Legal

En esta sección se menciona de forma resumida los aspectos más importantes a tomar en cuenta en la elaboración de la propuesta técnica de un proceso de disposición final de RSU por tratamiento térmico en el caso de estudio del Distrito Federal. El marco legal contempla los aspectos ambientales y de generación de energía eléctrica.

4.4.1 Marco Legal en Materia de Energía

Entre las Leyes y Reglamentos Federales que regulan la generación de Energía Eléctrica se encuentran:

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 23 de 100	

- Ley de la Comisión Reguladora de Energía.
- Ley que Crea la Comisión Federal de Electricidad.
- Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica.
- Reglamento de la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica.

La implementación del proyecto requiere el tipo de permiso de autoabastecimiento para la generación de energía eléctrica, el cual es otorgado por la Secretaría de Energía y la Comisión Reguladora de Energía (CRE). En el Artículo 36, Fr. I, de la Ley, se entiende por autoabastecimiento a la utilización de energía eléctrica para fines de autoconsumo siempre y cuando dicha energía provenga de plantas destinadas a la satisfacción de las necesidades del conjunto de los copropietarios o socios. Los interesados en obtener un permiso de autoabastecimiento deberán ser copropietarios o constituir una sociedad que tenga por objeto la generación de energía eléctrica para la satisfacción del conjunto de las necesidades de sus socios.

Cabe mencionar que la CFE en sus leyes y reglamentos contempla la regulación de las fuentes generadoras de energía y combustibles, principalmente a las del petróleo y sus subproductos derivados. Es importante mencionar que en los documentos legales relacionados con el tema, no se tiene contemplado el uso de RSU como materia prima para la generación de energía eléctrica y también se excluye de las energías renovables en la Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía.

4.4.2 Marco Legal en Materia Ambiental

El marco legal en materia ambiental va desde los Artículos 4, 25, 27, 77 y 115 de la Constitución Política, los cuales refieren acerca del derecho de gozar un ambiente saludable y las responsabilidades para protegerlo. A nivel Federal y Estatal se tienen principalmente Leyes, Reglamentos, Normas Oficiales, Normas Mexicanas y Normas Ambientales del Distrito Federal entre los que se encuentran:

- Ordenamientos Jurídicos Federales:
 - Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (LGEEPA)
 - Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
 - Reglamento de la LGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos
 - Reglamento de la LGEEPA en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.
 - Reglamento de la LGEEPA en Materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 24 de 100	

- Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

- Ordenamientos Jurídicos Estatales:
 - Ley Ambiental del Distrito Federal
 - Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal
 - Reglamento de la Ley Ambiental del Distrito Federal
 - Reglamento de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal
- Normas Oficiales Mexicanas, Normas Mexicanas Técnicas (No Oficiales) y la Norma Ambiental del Distrito Federal.

Las Normas Oficiales regulan los límites máximos permisibles de emisión, así como el ciclo de vida de un tratamiento de disposición final de RSU. Específicamente en el manejo de RSU, la clasificación de los residuos se encuentra establecida en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y su Reglamento, así como en la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal y su Reglamento. La propiedad y el manejo de los RSU se definen en la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, estos son responsabilidad de la Secretaría de Obras o la delegación o las personas físicas autorizadas tienen la propiedad de los residuos sólidos urbanos. El manejo de los RSU está a cargo de la Dirección General de Servicios Urbanos, o las Delegaciones o concesionados.

La LGPGIR define que los procesos de pirolisis y gasificación son procesos de termólisis y junto con el plasma, se incluyen en la definición de incineración. Los procesos de termólisis deben demostrar el cumplimiento con las normas correspondientes. Un listado de la Normas a tomar en cuenta técnicamente en la propuesta de un proyecto de gasificación de RSU se muestra a continuación:

- NOM-043-SEMARNAT-1993 - Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas
- NOM-052-SEMARNAT-2005 - Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
- NOM-053-SEMARNAT-1993- Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- NOM-083-SEMARNAT-2003 - Especificaciones de protección ambiental del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 25 de 100	

- NOM-098-SEMARNAT-2002 - Establece la especificación de operación y límites de emisión de contaminantes en la incineración de residuos.

4.4.3 Marco Legal a Nivel Internacional

De manera particular, desde el punto de vista del Protocolo de Kyoto que tiene como periodo de compromiso 2008-2012, el proyecto podría tener posibilidad de considerarse en alguno de los mecanismos para reducción de emisiones de gases de efecto invernadero si se compara con las emisiones causadas por la disposición de RSU actual.

El Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes, la Convención de Rotterdam y el Convenio de Basilea son regulaciones a nivel internacional para regular la contaminación a lo largo del ciclo de vida de los productos químicos. Contemplan instrumentos legales en su producción, transporte y manejo de residuos. Estos convenios se encuentran encaminados específicamente a la eliminación de ciertos insecticidas y de compuestos orgánicos persistentes. En específico en el proyecto se debe evitar la emisión de dioxinas y furanos que se encuentran en la lista de compuestos orgánicos persistentes. El Protocolo de Montreal regula los compuestos cloro-fluoro-carbonos a nivel global que afectan la capa de ozono y junto con los convenios mencionados representan compromisos internacionales ratificados por México.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 26 de 100	

5. MARCO TEÓRICO

La oxidación parcial puede ser aplicada a alimentaciones sólidas que pueden ser carbón, coque de petróleo, combustibles con alto contenido de azufre, materiales que de otra forma se dispondrían como residuos y biomasa. Existen otros procesos térmicos similares que son la pirólisis y la incineración, la diferencia radica en el nivel de oxígeno en la reacción, calentamiento interno o externo, temperatura de operación y productos.

La gasificación se lleva cabo con suministro controlado del agente oxidante de manera que se encuentre en el reactor en cantidades subestequiométricas y produzca un gas de síntesis. Sin embargo, es importante resaltar que en la práctica se alimentan cantidades de oxígeno mayores a las estequiométricas, sin que se compare con procesos de incineración los cuales manejan relación de oxígeno y carbono mayores a 2.5 (Phillips 2010). Los reactores de gasificación se clasifican en dos tipos, convencional o gasificación por plasma (Gasification Technologies Council 2011).

El gas de síntesis está compuesto principalmente de hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Dependiendo de la temperatura de los procesos se obtienen subproductos como carbón no quemado, alquitranes, cenizas o escorias. El uso final de los productos de la gasificación puede ser como materia prima de otros procesos o como combustible para la generación de energía eléctrica. La temperatura de operación se encuentra entre un intervalo de 500 a 1,500 °C y la presión de operación es de atmosférica a 40 bar para ciclos combinados (Higman 2003). El reactor donde se llevan a cabo las reacciones químicas de gasificación se le conoce como gasificador. El agente oxidante alimentando al gasificador ya sea como oxígeno puro o aire se consume en las reacciones de combustión 1 a 4 (Cheremisinoff 2005) (Higman 2003). La reacción 2 es de gasificación, mientras que la 1 es de combustión.

$$\Delta H_f = -393.51 \text{ kJ/mol (1)}$$

$$\Delta H_f = -110.54 \text{ kJ/mol (2)}$$

$$\Delta H_f = -241.82 \text{ kJ/mol (3)}$$

$$\Delta H_f = -283 \text{ kJ/mol (4)}$$

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 27 de 100	

La reacción 5 se considera como las reacciones principales agua-gas en la que se gasifica por medio de vapor. Esta reacción es endotérmica y favorecida a altas temperaturas y bajas presiones.

$$\Delta H_f = 131.27 \text{ kJ/mol} \quad (5)$$

La reacción Boudouard (6) es endotérmica y la reacción de hidrogasificación (7) es muy lenta, a excepción de cuando se realiza a altas presiones:

$$\Delta H_f = 173 \text{ kJ/mol} \quad (6)$$

$$\Delta H_f = -75 \text{ kJ/mol} \quad (7)$$

Si se obtiene una eficiencia térmica menor al 50%, el proceso no es rentable, el límite inferior es del 65% y algunos procesos con carbón llegan al 80% (Phillips 2010). Se han realizado evaluaciones de la eficiencia en base al poder calorífico inferior en la gasificación de RSU de plasma integrada a un ciclo combinado y se ha reportado una eficiencia total de 31% (Minutillo 2009). El modelado de los gasificadores suponiendo equilibrio termodinámico es correcto para la mayoría de los casos (Cheremisinoff 2005). La temperatura de la gasificación es tan alta que no es necesario considerar la formación de otros hidrocarburos conocidos como alquitranes. Los siguientes procesos ocurren secuencial o simultáneamente, dependiendo del diseño del reactor y del material alimentado:

- Secado – Cuando la temperatura de alimentación se incrementa, el agua es el primer componente que se transforma al transferirse a la fase gaseosa.
- pirólisis– Posteriormente la temperatura aumenta y la pirólisis se lleva a cabo convirtiendo a la alimentación en carbón, volátiles y muy bajos niveles de acetilenos, olefinas, aromáticos y alquitranes.
- Gasificación o Reducción– Es el resultado de las reacciones químicas entre el carbón, vapor, dióxido de carbono e hidrógeno
- Combustión u Oxidación – Las reacciones se llevan a cabo cuando el carbón y la alimentación seca se quema. La combustión del carbón o de la alimentación produce cenizas o slag (Cheremisinoff 2005).

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 28 de 100	

5.1.1 Gasificación Convencional

El beneficio principal de la gasificación de RSU es la disminución de volumen, un ejemplo del proceso de gasificación de RSU se puede apreciar en la Figura 2. Este proceso consta de la preparación de los RSU en base a los requerimientos de alimentación del gasificador. Los procesos principales son la trituración y el cribado. Sin embargo, existen otras separaciones que pueden separar los residuos de forma que su poder calorífico aumente. Los tipos de reactores gasificadores serán discutidos más adelante, en general, los subproductos de un gasificador son las cenizas o el slag (escoria). Como producto principal del proceso se encuentra el gas de síntesis. El gas de síntesis tiene innumerables usos en la industria química y en la producción de energía eléctrica. El lavado de gases depende de los contaminantes presentes en el gas y en los requerimientos de calidad de los generadores de energía eléctrica.

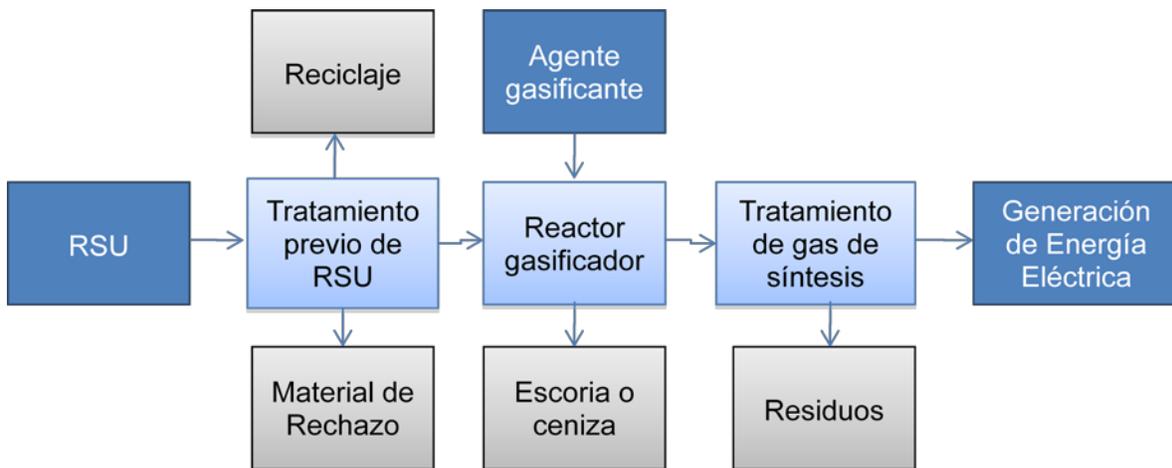


Figura 2. Diagrama de un ejemplo de proceso de gasificación convencional de RSU.

Existen diferentes tipos de gasificadores, la mayoría se diseña para la alimentación de carbón, sin embargo se pueden aplicar a otros tipos de combustibles. La diferencia más importante con el carbón es la cantidad de carbón no quemado como producto de la gasificación, en los residuos es de aproximadamente 12% (Maoyun 2009). Los tipos de gasificadores se clasifican como se lista a continuación:

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 29 de 100	

- 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 con oxígeno como gasificante, a altas temperaturas y presiones. La temperatura del gas de salida es de 1,200°C y el subproducto sólido es el slag o escoria (Higman 2003). La alimentación y el aire se mueven en flujo paralelo las reacciones ocurren en una nube densa a altas presiones que varían entre 19.7-69.1 atm. En la siguiente figura se observa dos configuraciones típicas para este reactor:

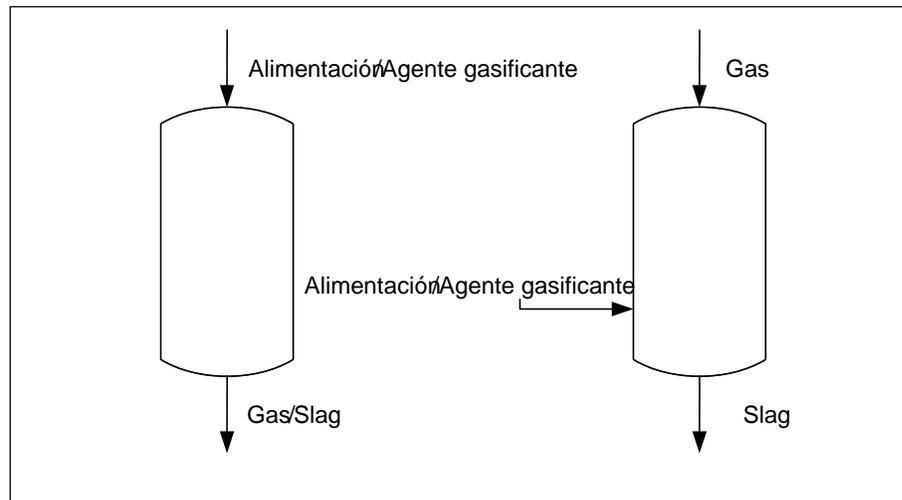
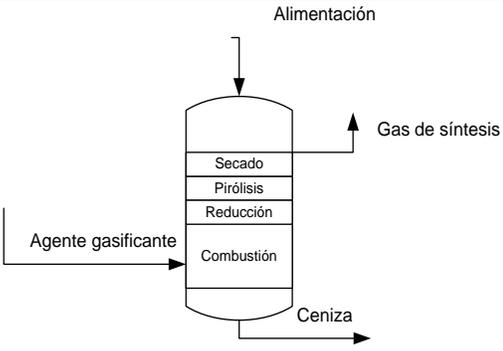
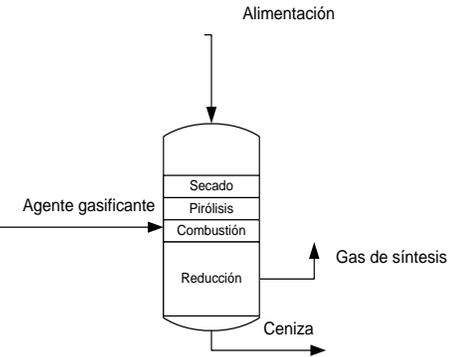


Figura 3. Esquema de gasificador con flujo de arrastre (Higman 2003).

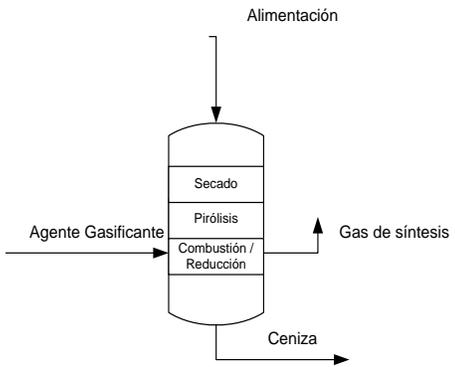
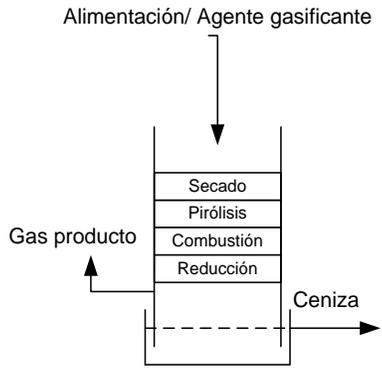
- Lecho fijo:** Presenta una zona de reacción fija, el nivel de mezclado es bajo y la temperatura no es uniforme. Existen diferentes arreglos en este tipo de gasificadores dependiendo de la dirección de los flujos de alimentación y del agente oxidante. Estos arreglos se observan en el gasificador de flujo a contracorriente (*Updraft*), el gasificador en paralelo (*Downdraft*), el gasificador en flujo cruzado y gasificador de núcleo abierto. La temperatura del gas de salida se encuentra entre 920-1,050°C con una alimentación menor a 6 mm, las cenizas son secas y aglomeradas. En la siguiente tabla se describen los gasificadores de lecho fijo.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 30 de 100	

Tabla 4. Descripción de gasificadores de lecho fijo (World bank 1999).

Gasificador	Esquema
<p>Con flujo a contracorriente. La alimentación se seca y se piroliza. En la reducción estos productos se convierten en CO y H₂. El carbón que se acumula en la parte inferior del reactor donde sufre combustión que produce calor.</p>	
<p>Con flujo en paralelo. Este flujo origina un cambio en las zonas de reacción. Se llama de flujo paralelo porque el agente gasificante y el material alimentado se mueven en la misma dirección. La zona de secado y pirolisis se calientan con el calor irradiado por la zona de combustión de carbón. Se requiere una alimentación con un contenido de cenizas bajo para evitar el taponamiento. Es ideal para procesos de pequeña escala por que producen un gas limpio. El lecho se soporta por una reducción de tamaño en el recipiente que es útil para una mezcla homogénea.</p>	

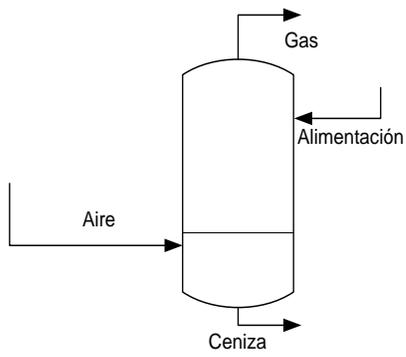
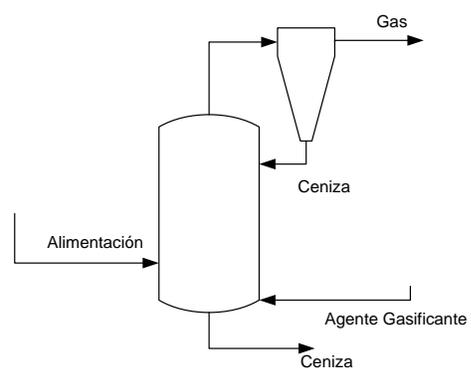
	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 31 de 100	

Gasificador	Esquema
<p>De flujo cruzado. La alimentación se adiciona en la parte superior del reactor. El agente gasificador se introduce en un lado del reactor y el gas producto se obtiene del lado contrario en el mismo nivel horizontal.</p>	
<p>Núcleo abierto. Se utiliza para material fino, donde el lecho se soporta en el hogar. Cuenta con una base de agua para remover las cenizas.</p>	

- Lecho fluidizado:** La temperatura de la salida de gas es de 420 a 650°C con un tamaño de alimentación de hasta 300 mm. Los subproductos sólidos son ceniza seca o *slag*. Los gasificadores de lecho fluidizado están bien mezclados y con temperatura uniforme. En este tipo de gasificadores en ocasiones se usa medio fluidizante como arena. En la siguiente tabla se observan las características de estos sistemas y su configuración.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 32 de 100	

Tabla 5. Descripción de gasificadores de lecho fluidizado. (World bank 1999).

Gasificador	Esquema
<p>Lecho fluidizado burbujeante incluye un reactor vertical con una parrilla en la parte inferior, a través de la cual se inyecta el oxidante en burbujas a través del lecho. La temperatura de la cama se mantiene entre 700-900 °C.</p>	
<p>Lecho fluidizado circulante, la cama de material caliente se circula entre el reactor y un ciclón separador. Durante esta circulación los materiales de la cama y el carbón regresan al reactor, mientras la ceniza es separada y removida del sistema. La densidad típica es de 560 kg/m, con una velocidad del aire de 9.1 m/s. El tamaño de las partículas y la velocidad de gas son los parámetros más importantes.</p>	

En la siguiente tabla se observan los proveedores de las tecnologías de cada tipo de gasificador.

Tabla 6. Proveedores de reactores de gasificación (Cheremisinoff 2005).

Tipo de gasificador	Proveedores de tecnología
Lecho arrastrado	Hitachi, Shell Coal, Mitsubishi Heavy Industries, GE (Texaco), Babcock Borsig Power, E-Gas o Destec y Prenflo
Lecho fluidizado	Rheinbraun, Herman Research Pty Limited, Sierra Pacific Resources, Coal Technology Development Division of British Coal, BHEL y Kellogg Transport.
Lecho fijo	The British Gas/Lurgi. BHEL y Lurgi

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 33 de 100	

5.1.2 Gasificación por plasma

El calentamiento por plasma es una tecnología que se ha usado en plantas industriales con aplicaciones que van desde industria química a metalúrgica. La tecnología de plasma se basa en la ionización de gas inerte por medio de descargas eléctricas o fotoionización, resultando en la formación de un arco eléctrico con temperaturas tan altas como 6,000°C. El plasma se produce a través de una antorcha, este aparato convierte electricidad en calor vía la resistencia del plasma. La aplicación de la tecnología de plasma a RSU causa la gasificación y disociación molecular de la materia orgánica a 2,000°C. Al agregar vapor se dan las reacciones de gasificación sin reacciones intermedias. La gasificación por plasma virtualmente puede procesar cualquier residuo sin tratamiento previo, y el reactor se diseña en base a las características físicas de la alimentación. La antorcha está usualmente montada en la pared de un contenedor circular y está alineada para que los residuos caigan en la zona del arco de plasma. El cátodo y el ánodo de la antorcha son enfriados con flujo forzado de agua y aire. Un ejemplo de configuración de reactores de plasma se muestra a continuación.

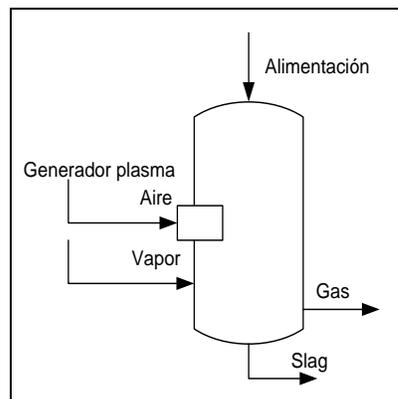


Figura 4. Esquema de reactor de plasma (Linghong 2010).

El nitrógeno o el aire son los gases que se usan usualmente para crear el plasma, se adiciona vapor u oxígeno para producir las reacciones de gasificación (Cheremisinoff 2005). Las antorchas se clasifican de acuerdo con el tipo de electrodos, la antorcha de arco no transferido es la más común en tecnologías de pirolisis, la cual está constituida por dos electrodos. Las antorchas de arco no transferido están disponibles en niveles de potencia entre 1 kW y 6 MW, con rangos de eficiencia térmica entre el 50% y el 90%.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 34 de 100	

El reactor es el sistema conformado por un recipiente u horno, dentro del cual son alimentados los residuos a tratar, expuestos a una gran energía térmica. Una planta de tratamiento de RSU mediante antorcha de plasma incluye principalmente las siguientes secciones: una sección de alimentación; la unidad de reacción, el sistema de limpieza de gases. En general, los materiales alimentados son los RSU, el agente gasificante, el gas inerte y como subproductos se obtienen gas de síntesis y slag. El slag de este proceso tiene valor comercial, ya sea como sustituto de agregado en concreto, sub-base en caminos de construcción y material base para realizar trabajos de limpieza de equipos de proceso con arena o como materia prima para productos cerámicos (Lemmens 2006). En la siguiente figura se observa el proceso de gasificación por arco de plasma de RSU. Se puede mencionar a empresas que ofrecen esta tecnología, tales como StarTech, Solena Group, Geoplasma, Europlasma, entre otras.

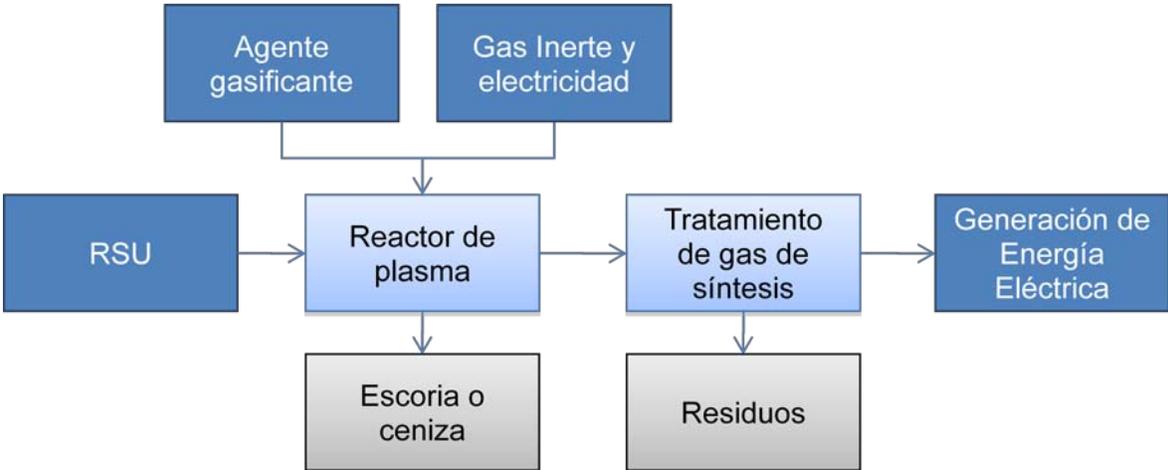


Figura 5. Diagrama de proceso de RSU con gasificación por arco de plasma.

5.1.3 Tecnologías Comerciales de Gasificación de RSU

En los estudios de mercado se clasifican las tecnologías de gasificación de RSU de acuerdo a sus productos (Juniper 2001). El producto final reportado por los proveedores de la tecnología puede ser energía eléctrica por combustión de gas de síntesis sin previa limpieza o la producción de gas de síntesis limpio. En el siguiente diagrama se observa las tecnologías disponibles para escalas medianas a grandes. En general, estas tecnologías manejan procesos de gasificación con generación de slag, ya sea en el gasificador o en

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 35 de 100

una cámara de combustión y el gas de síntesis ya sea con o sin proceso de lavado de gas y se usa en la producción de energía eléctrica por medio de la generación de vapor.

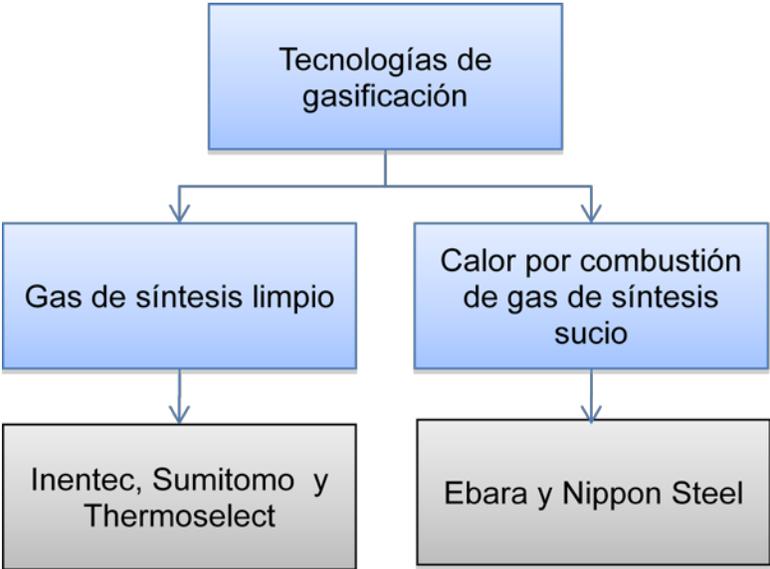


Figura 6. Diagrama de tecnologías de gasificación de RSU de escala mediana a grande (Juniper 2001)

A continuación, se describen estas tecnologías, se incluye la descripción de la tecnología de gasificación por plasma de la compañía Inentec.

Thermostelect. Los residuos que arriban a la planta por medio de carro tanques se alimentan a una bodega que incluye una atm;osfera de nitrógeno y en seguida pasan a una prensa por medio de una grúa, la prensa tiene la única función de formar tapones de material para alimentar al reactor. Los residuos compactos pasan por un canal donde secan al entrar en contacto con altas temperaturas y donde se alimentan los lodos del tratamiento de agua y lodos de carbón. El agente gasificador es el oxígeno y el reactor cuenta con una alimentación de gas natural, el cual se usa para el arranque y en la sección inferior del gasificador. El gasificador es un lecho mixto en él se lleva a cabo una pirolisis seguida de una gasificación, el cual tiene partes con enfriamiento por agua. Los productos del proceso son agua tratada, sales, azufre, metales, minerales y gas de síntesis. La temperatura del gas de síntesis es de 1,200°C, con una presión de 350 mbar y sus

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 36 de 100	

componentes son el hidrógeno al 42%, dióxido de carbono al 25%, monóxido de carbono al 4%, y agua, este gas se enfría hasta aproximadamente 90°C.

Los metales y minerales que son extraídos de la parte inferior del reactor se enfrían por medio de un enfriamiento súbito, donde se distinguen dos fases, una metálica y otra de minerales que se para separan por medios magnéticos (Thermoselect 2011). El lavado de gases inicia en un sistema quench con la remoción de gases ácidos y partículas con agua a pH de 3 que remueven ácido clorhídrico y fluorhídrico, metales pesados volatilizados y amoniaco. También incluye lavadores alcalinos con hidróxido de sodio donde se remueven ácidos, carbonatos y sulfatos. Después se tiene un dispositivo de seguridad en caso de descarga del gas de síntesis que incluye la combustión en una cámara y los gases exhaustos se limpian por medio de un quench, un lavador y una unidad adsorbadora. En seguida se tiene un lavador de partículas y el ácido sulfhídrico del gas de síntesis se remueve en un proceso redox, en un lavado líquido que contiene un complejo de iones. El H₂S se reduce a azufre elemental y agua, la regeneración del absorbedor se lleva a cabo por medio de aire. El azufre elemental se separa de la mezcla líquida por medio de la centrifugación del líquido. En seguida, se tiene un sistema quench, y un precipitador electrostático. El uso del gas de síntesis es en una cámara de combustión con un boiler. Se usan dos catalizadores, uno para reducir el CO, y otro para reducir las emisiones de NO_x, seguidos de una adsorción para eliminar el mercurio de los gases de combustión. (Kaiser 2004). Los calentadores operan a 485°C y 64 bares y el poder calorífico alto requerido para esta tecnología es de 8 MJ/kg. Para una planta de 260 toneladas por día, se cuenta con 4 módulos con un factor de planta del 85%. La eficiencia térmica es de 51% y se generan 61 MW con un consumo interno de energía del 26%.

El tratamiento del agua del quench incluye un sedimentador. El agua del lavado alcalino se oxida por medio de peróxido de hidrógeno, además se trata por medio de precipitación para eliminar los sulfatos y los hidróxidos de hierro y aluminio se remueven también. El lodo remanente se centrifuga y algunos sólidos se regresan al gasificador, mientras que los líquidos se tratan con NaOH para elevar su pH. En seguida se remueven metales pesados y el agua que resta, se trata por medio de HCl, resinas de intercambio iónico, osmosis inversa y evaporación. Las variables a controlar en el reactor son el flujo de material fundido, nivel, temperatura y presión del gas a la salida del reactor, la cantidad de oxígeno en la salida del reactor y la temperatura de salida del gas del quench. La limpieza de gases se controla a través de las variables de nivel y temperatura. En la siguiente figura se observa el proceso Thermoselect.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 37 de 100	

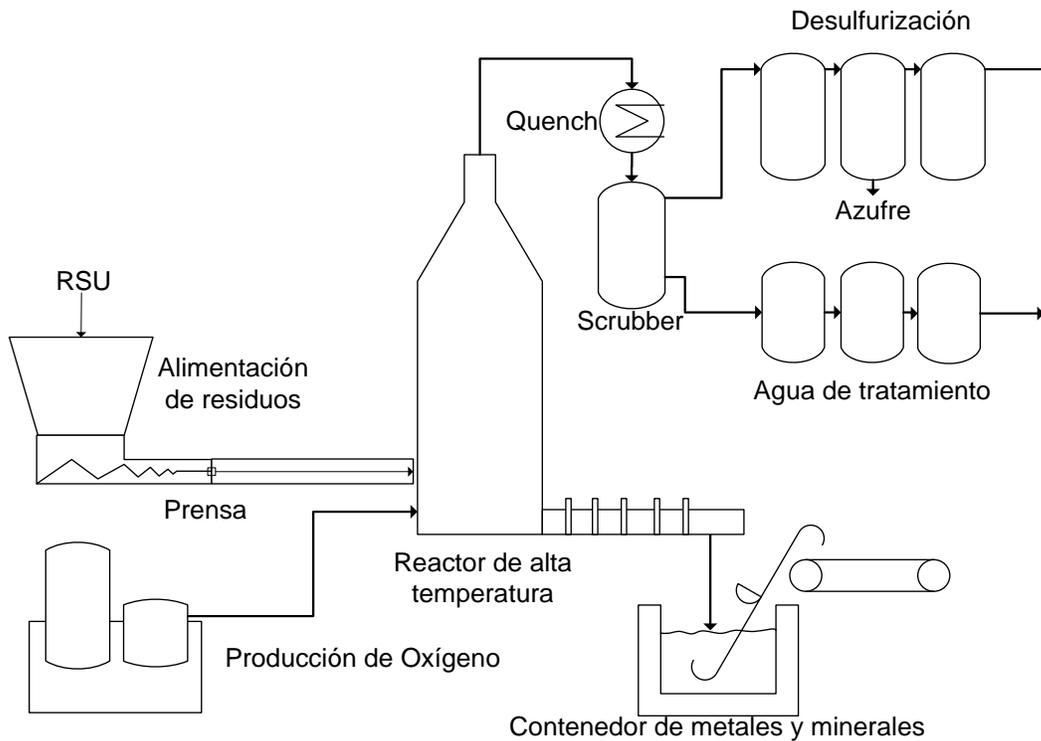


Figura 7. Diagrama del Proceso Thermostelect (Thermostelect 2011)

Nippon Steel. En este proceso se combina la combustión de cama fija (Updraft) con procesos de combustión y fundido. El tratamiento previo se realiza una remoción de vidrio y metales así como una densificación del material para obtener pellets. La alimentación pueden ser residuos sólidos urbanos, residuos industriales, llantas, entre otros. Los residuos se alimentan por medio de una grúa junto con coque, y cal por la parte superior del horno. Mientras los residuos se dirigen hacia la parte inferior del gasificador, pasan por tres zonas. En la primera la humedad es evaporada a temperaturas entre 200-300°C. En la siguiente zona el residuo seco desciende gradualmente por el horno, y la temperatura aumenta de 300 a 1,000°C en la ausencia de oxígeno donde los constituyentes se descomponen a CH_4 , CO , H_2 y NH_3 .

En la tercera zona, los productos de reacción se someten a una combustión y los residuos de este proceso se fusionan. La alimentación y en especial el coque alcanza la zona de combustión cuando reacciona con los productos de gasificación en presencia de aire enriquecido de oxígeno que se inyecta a esta parte del horno generando una alta

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 38 de 100	

temperatura y calor intenso. Los materiales inorgánicos se fusionan a 1,800 °C y se pueden separar granulados y con imanes. El gas de síntesis producido se quema en la cámara de combustión para recuperar el calor en la generación de electricidad después de la remoción de polvo produciendo un gas de combustión de 800-900°C, el cual se limpia por medio de un filtro de bolsas, y un reactor catalítico selectivo para eliminar los compuestos de nitrógeno (Juniper 2001). El proceso puede manejar 400 toneladas/día, en dos unidades, su producción de energía es de 8.5 MW, con una eficiencia térmica global de 18%.

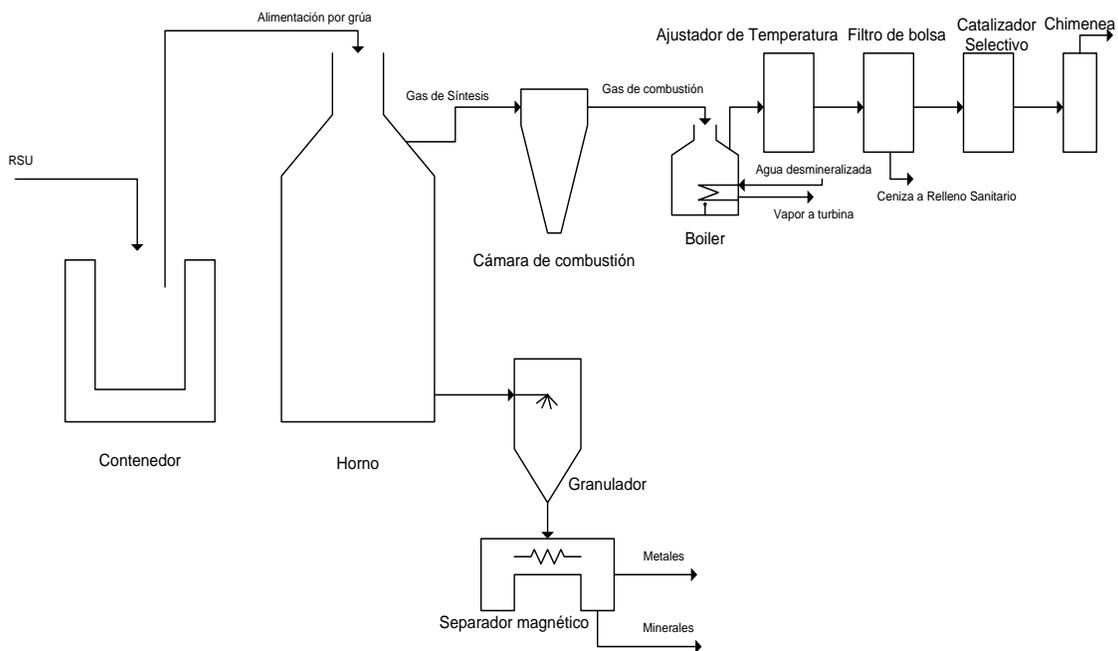


Figura 8. Diagrama del Proceso de Nippon Steel (Nippon Steel 2005)

Ebara. La alimentación del gasificador debe tener un tamaño de partícula menor a 30 cm, los residuos deben ser triturados sin preparación adicional, el intervalo de temperatura del reactor es de 550°C y 600°C. El agente gasificante es aire y vapor. Los residuos del gasificador son metales y ceniza que representa el material no combustible. El tipo de gasificador que se maneja en esta tecnología es de lecho fluidizado circulante. El flujo de salida del gas incluye partículas finas que se dirigen a la siguiente etapa, la cual consta de una cámara de combustión ciclónica a temperaturas entre 1,350-1,450°C por adición de aire suficiente para una oxidación completa. En esta cámara las partículas se acumulan en las paredes, donde se vitrifican y se asientan en el horno. En esta tecnología el

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 39 de 100	

aprovechamiento de calor se da a través de la producción de vapor para la generación de energía eléctrica.

La escoria se somete a un baño de agua de enfriamiento para solidificarse. Se usa un generador de vapor compacto y el control de contaminación requerido que consta de eliminación de NO_x, un lavador de gases, un filtro de polvo y un filtro de bolsa. (Selinger 2004). El poder calorífico inferior requerido en esta tecnología varía entre 7.5 y 14.3 MJ/kg. En la siguiente figura se observa el proceso.

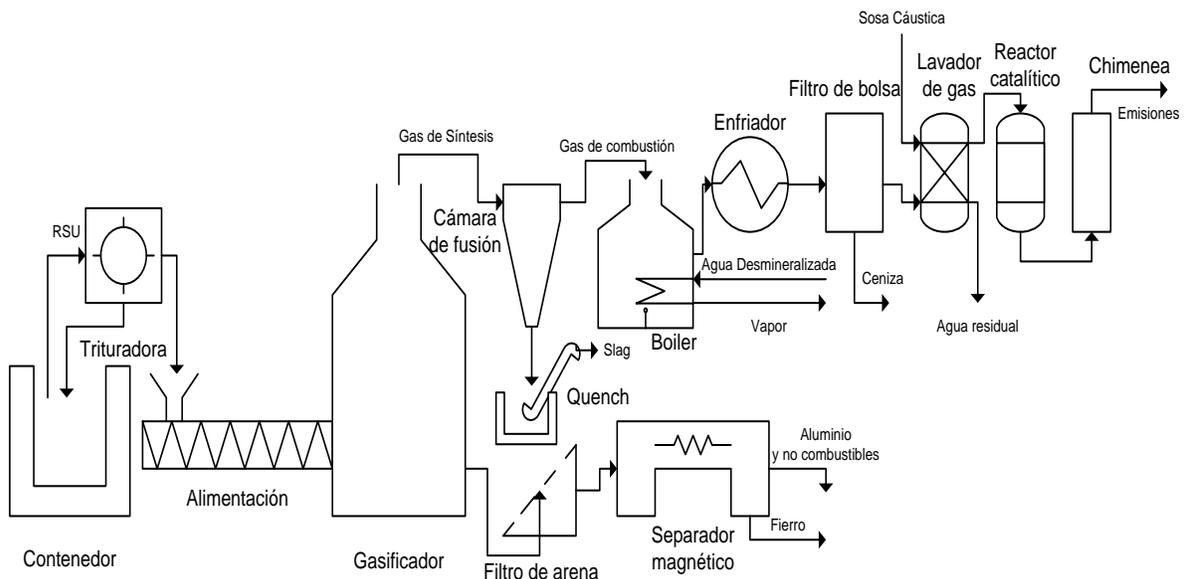


Figura 9. Diagrama del Proceso Ebara. (Urbaser, S. A. 2009)

Sumitomo. Este proceso inicia con la separación de metales, la trituración y el secado de los RSU hasta un 10% de humedad. En seguida se someten a una gasificación en un reactor de lecho fluidizado circulante a una temperatura de entre 800°C y 1,100°C, a una presión de entre 1.2 y 5 bar, usando oxígeno y aire. El agente gasificante se introduce en diferentes niveles del lecho y la mayor parte de la ceniza se remueve del gas de síntesis con un ciclón y se regresa al lecho por medio de una tubería. En seguida los residuos y el gas de síntesis pasan por un horno rotatorio a 1,300°C y el gas de síntesis sufre una combustión. Las cenizas son convertidas en slag en el horno. La energía de la corriente se usa en el secado de RSU y en la generación de energía eléctrica por medio de una turbina de vapor. La tecnología tiene el nombre de Precon[®], ya que originalmente es de la

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 40 de 100	

empresa Krupp Uhde, en el diseño original, la presión varía de ambiente a 30 bares y el gas de síntesis se limpia antes de ser utilizado en una turbina de vapor. La limpieza del gas consiste en un filtro cerámico, un lavador de agua, y una desulfurización (Malkow 2003).

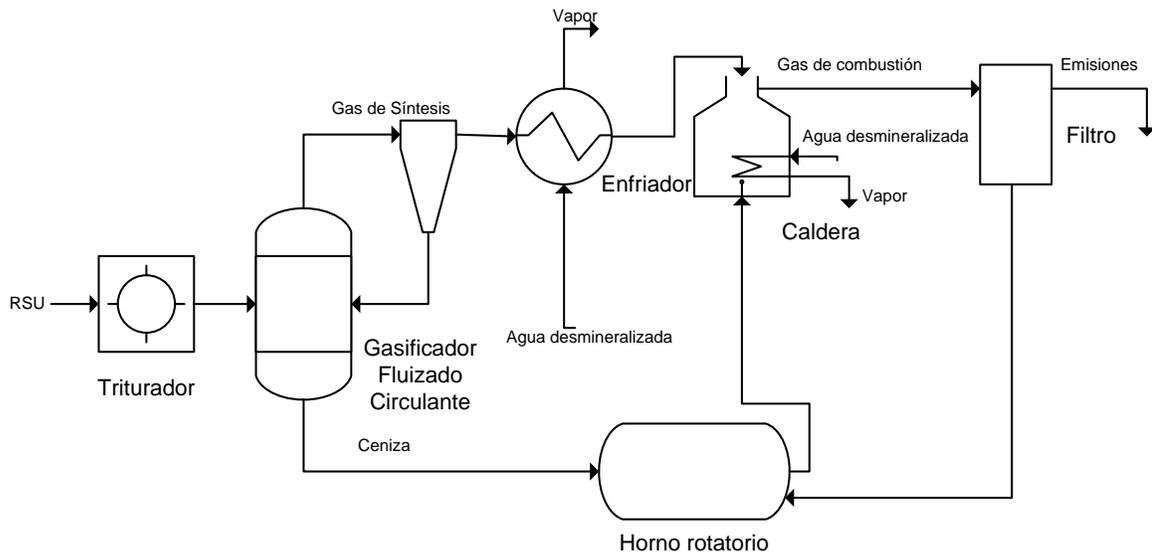


Figura 10. Diagrama del Proceso Sumitomo (Uhde Thyssenkrupp 2007)

Inentec. Esta empresa comercializa los sistemas PEM[®] (Plasma Enhanced Melter). El proceso PEM[®] típico inicia con la alimentación de los RSU, oxígeno y vapor, en seguida se pasa por un reactor plasma y el gas de síntesis obtenido se enfría por medio de un baño de agua de enfriamiento para evitar la formación de dioxinas y furanos, en seguida se pasa por un filtro de bolsa, un lavador de gases con solución básica, un eliminador de humedad, de nuevo se calienta para después pasar a un filtro de carbón activado. Este filtro de carbón activado puede ser impregnado con yoduro o sulfuro de potasio para asegurar la eliminación de mercurio. El reactor de plasma opera a 1,000°C con un arco de plasma con electrodos de grafito y los productos son gas de síntesis, metales y vidrio. El gas de síntesis se usa para la generación de energía eléctrica por medio de un motor de gas. El tratamiento previo de los residuos sólidos es función únicamente de su tamaño de partícula, en caso de que sean muy grandes será necesaria una trituration para poder alimentarlos a través de la tolva (Quapp 2002). El proceso se aprecia en la siguiente figura y su experiencia se centra en el tratamiento de residuos peligrosos

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 41 de 100	

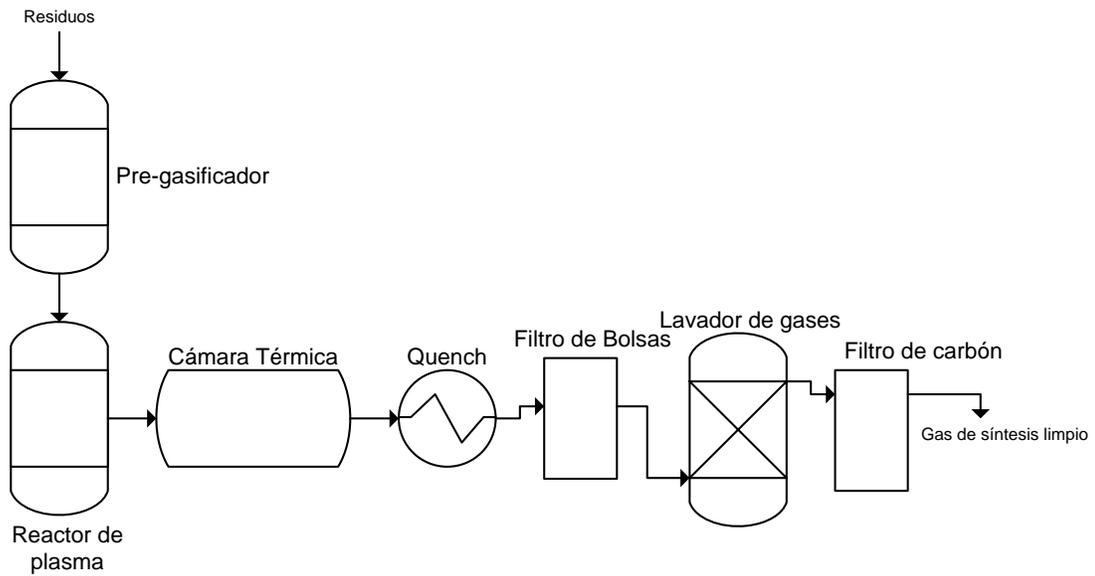


Figura 11. Diagrama del Proceso Inentec (Quapp 2002)

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 42 de 100	

5.1.4 Criterios de Diseño de un Gasificador.

El reactor gasificador convierte los RSU por medio de fenómenos en diferentes fases. En general los factores que afectan la calidad del gas producto son:

- Composición de la alimentación – La alimentación se compone principalmente de carbón disponible para reacciones, carbón fijo, humedad y componentes inorgánicos que forman las cenizas. La composición de la alimentación se define con un análisis aproximado.
- Tiempo de residencia
- Configuración de la planta:
 - Condiciones de operación del reactor
 - Sistema de limpieza de gas: Baja o alta temperatura y procesos usados para remover azufre, nitrógeno, partículas y otros compuestos que puedan impactar en la generación de energía eléctrica. La remoción de contaminantes debe ser efectiva para evitar la emisión de gases peligrosos a la atmósfera.

De estos factores, la composición de la alimentación es muy variable en los RSU, y puede ser controlada con un proceso de separación previo a la gasificación, esta separación debe llevarse a cabo en el origen aunque existen operaciones unitarias que pueden ser útiles para lograr varios objetivos, entre ellos se encuentra eliminar material precursor de compuestos tóxicos, obtener un poder calorífico más alto o reducir la cantidad de cenizas o *slag* (escoria) producido por medio de la remoción de inorgánicos. El tiempo de residencia afecta directamente en la conversión deseada de los reactivos a los productos y es función del flujo y del volumen del recipiente.

El uso de catalizadores en el reactor como la piedra caliza favorece la reducción de gases ácidos y metales pesados en el gas de síntesis. Las condiciones de operación críticas son la temperatura y la presión y están directamente relacionadas con la composición del gas por las relaciones termodinámicas y de equilibrio de los sistemas de gasificación. En general, el comportamiento y la relación de estas variables se describen a continuación:

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 43 de 100	

- La formación de metano decrece con el aumento de temperatura o el aumento de presión
- La formación del monóxido de carbono e hidrógeno incrementa con un aumento de temperatura y una reducción de presión.
- El dióxido de carbono incrementa con un incremento en presión y se reduce con un incremento en temperatura.
- Una reducción en la relación oxígeno-vapor incrementa la formación de hidrógeno y metano. Un aumento en esta relación aumenta la formación de CO y CO₂

En la Figura 12 se observa la composición del gas de síntesis según su temperatura, es importante mencionar que la alimentación de estos valores se compone de restos de comida, papel, textiles, madera y plásticos (Maoyun 2009). En la Figura 13 se observa la tendencia de la composición de gas de síntesis para temperaturas mayores a 1,000°C para gasificación de carbón.

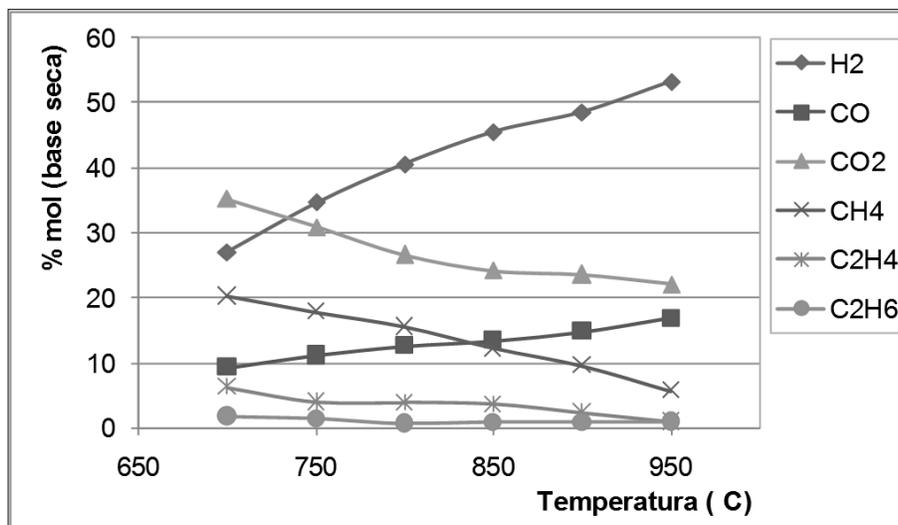


Figura 12. Composición de gas de síntesis a diferentes temperaturas (Maoyun 2009).

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 44 de 100

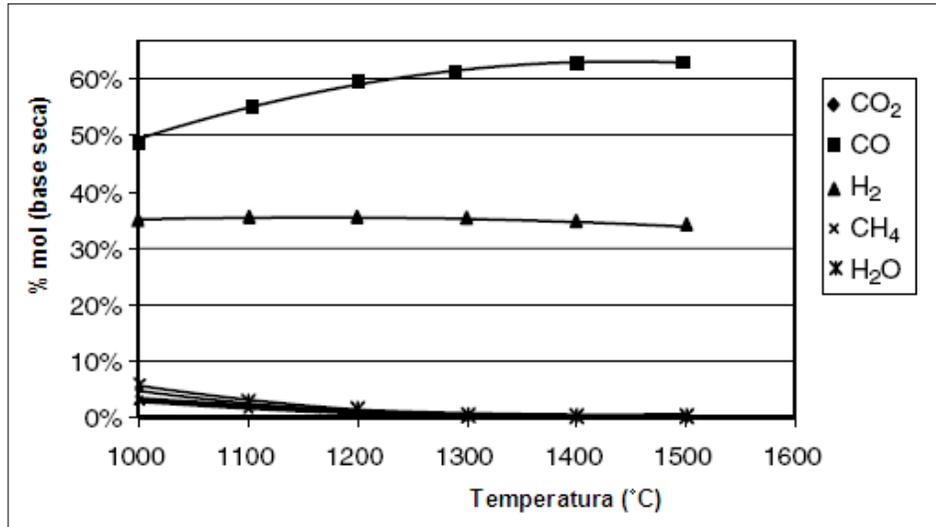


Figura 13. Composición de gas de síntesis a temperaturas mayores a 1,000 °C. (Higman 2003)

En la siguiente tabla se incluye información acerca de composiciones de gas de síntesis de la gasificación de diferentes tipos de alimentación.

Tabla 7. Composiciones típicas de gas de síntesis proveniente de gasificación.

Alimentación	Biomasa	Lignita	Carbón	RSU	Polietileno
Referencia	(Higman 2003)	(Higman 2003)	Planta Wabash	(Maoyun 2009)	(Rui 2007)
Temperatura (°C)	900	1000	1315	900	950
Presión (bar)	30	30	28	1.013	10
Agente gasificante	Aire	Oxígeno/Vapor	Oxígeno	Aire	Aire
Tipo de reactor	Lecho fluidizado	Lecho fluidizado	Lecho de arrastre	Lecho fluidizado	Lecho fluidizado
Composición	% mol	% mol	%vol	%mol	%vol
H ₂	18.9	32.8	34.4	48.63	
CO	31	56.7	45.3	14.85	23

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 45 de 100	

CO₂	6.7	6.2	15.8	23.59	11
CH₄	2.1	2.6	1.9	9.62	5
Poder Calorífico (MJ/Nm³)	-	-	7.96	10.77	9.25

Con base a los factores que determinan la calidad del gas de síntesis, los criterios de diseño de un reactor gasificador se observan en la siguiente tabla.

Tabla 8. Criterios técnicos de diseño de un gasificador de residuos sólidos.

Características	Criterios
Tamaño de partícula	Si el gasificador opera con un tamaño de partícula muy pequeño serán necesarias un mayor número de operaciones unitarias de trituración y cribado.
Humedad de alimentación	El gasificador debe ser versátil en el contenido de humedad, en caso de requerir un valor de humedad muy bajo, se incluye en el proceso una operación de secado. El gas de síntesis de una alimentación húmeda contiene más CO ₂ .
Presión	La operación de sistemas a presión tiene un costo alto y tiene implicaciones de seguridad. Sin embargo, la formación de hidrógeno se favorece a altas presiones al contrario de la formación de metano. Los sistemas de alta presión se prefieren para el uso de ciclos combinados y para economizar en el dimensionamiento de sistemas de limpieza de gases, ya que se maneja un volumen de gas menor.
Temperatura	La temperatura está relacionada con la conversión de los RSU, e incluso con la formación de dioxinas y furanos. Por otra parte el acoplamiento a sistemas de producción de energía eléctrica y formación de contaminantes que definirán el sistema de gas de limpieza del gas.
Capacidad de procesamiento	Si la capacidad de procesamiento es baja, se requerirán un número de reactores mayor.
Agente Gasificante	El agente gasificante puede ser aire, aire enriquecido con oxígeno, oxígeno, vapor, CO ₂ . Mientras el contenido de oxígeno del gasificante sea mayor, se obtiene un gas de síntesis con un mayor poder calorífico debido a que mientras más contenido de nitrógeno se tenga a la entrada, el efecto de dilución del gas combustible es mayor. El oxígeno se puede

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 46 de 100

Características	Criterios
	suministrar por medio de una unidad de separación de oxígeno basada en tecnología criogénica y un compresor. El uso de aire u oxígeno depende de la capacidad de las plantas, por razones económicas en la mayoría de los ejemplos, se aprecia que para una producción de energía menor a 50MW se usa aire (Higman 2003).
Rendimiento de gas	Cantidad de gas producto por cantidad de RSU alimentados
Eficiencia	Se define como la relación de poder calorífico del gas producto entre el poder calorífico de la entrada.

La gasificación convencional se refiere a aquellas tecnologías que manejan reactores de lecho fijo, fluidizado, de arrastre o mixto. Con el objetivo de elegir entre ambos tipos de gasificadores, en la literatura se encontró el análisis de los datos disponibles con respecto a estas tecnologías de tratamiento térmico esencialmente valorando aspectos técnicos, económicos y disponibilidad en el mercado. Se encontró que al comparar criterios técnicos, los cuales son la capacidad, electricidad producida, así como experiencia y costos de mantenimiento, operación e inversión de los tratamientos térmicos desde incineración, pirólisis, gasificación convencional y gasificación plasma; se concluye que la tecnología más viable para los RSU del DF es la gasificación convencional (Cabrera Delgado 2010). Se han encontrado reportes de más de 50 plantas de gasificación convencional instaladas en el mundo; los costos de operación y mantenimiento son tan altos como los de la pirólisis o la tecnología de plasma, sin embargo no es la tecnología con el costo de inversión más alto. La evaluación se llevó a cabo por medio de una matriz multicriterio con asignación de calificación a los criterios técnicos, económicos y de nivel de experiencia cuantificables. A cada criterio se le asignó un peso diferente y para llevar a cabo la evaluación se usó el software Decision Lab 2000®, el cual arroja un orden preferencial de las alternativas el cual puede ser parcial o total. En el orden preferencial total, la mejor alternativa es la gasificación convencional.

Para este trabajo se tomará la gasificación convencional como la mejor opción con un gasificador de lecho fluidizado circulante. En la literatura se encontró que este tipo de reactor es el más viable para sistemas en gran escala y presenta el mejor desempeño técnico con respecto al gasificador de lecho fijo y el gasificador de lecho de arrastre (Belgiorno 2003); (Gómez-Barea 2010); (Chen 2011). Este desempeño es comparado entre los tipos de gasificadores de bueno a excelente en criterios tales como conversión de carbón, eficiencia térmica, elasticidad en el tamaño de alimentación, escalamiento a nivel comercial, en el mezclado y seguridad.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 47 de 100	

Este tipo de tecnología existe en modelos comerciales enfocados a biomasa, carbón y RSU de los proveedores Lurgi y Foster Wheeler, las cuales gasifican residuos orgánicos a mediana y pequeña escala. La empresa EBARA emplea este tipo de tecnología en la gasificación de RSU a escala comercial (Juniper 2001). El volumen de este tipo de gasificadores es función de la fase gas y requieren de aislamiento por temperatura, así como de quemadores y de una alimentación de piedra caliza para evitar la formación de compuestos de azufre. En general las características de los gasificadores de lecho fluidizado circulante se listan a continuación. En la siguiente figura se observa un diagrama detallado de este tipo de gasificadores.

Tabla 9. Características típicas de los gasificadores de lecho fluidizado circulante.

Característica	Datos Técnicos
Tamaño de Partícula.	Hasta 30 cm (EBARA 2004)
Humedad del Material.	20-60% para RDF (Foster Wheeler) 27-45% para Carbón (Foster Wheeler 2004) 45-58% para biomasa (Juniper 2001)
Presión.	20 bar en modelo Foster Wheeler (Higman 2003) Presión atm en modelo Lurgi y Ebara. (Juniper 2001) De 5-10 bar con presurización por medio de válvulas y nitrógeno de unidad de separación de aire. (Higman 2003)
Rango de Temperatura.	500-650 °C para RSU (EBARA 2004) 650-1,000°C (Belgiorno 2003)
Agente Gasificante.	Aire, Oxígeno, vapor (Higman 2003)
Capacidad de procesamiento.	500 t/día Lurgi (Higman 2003)
Densidad del Lecho.	560 kg/m ³ (Klein 2002)
Velocidad del Lecho.	5-10 m/s (Belgiorno 2003)

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 48 de 100	

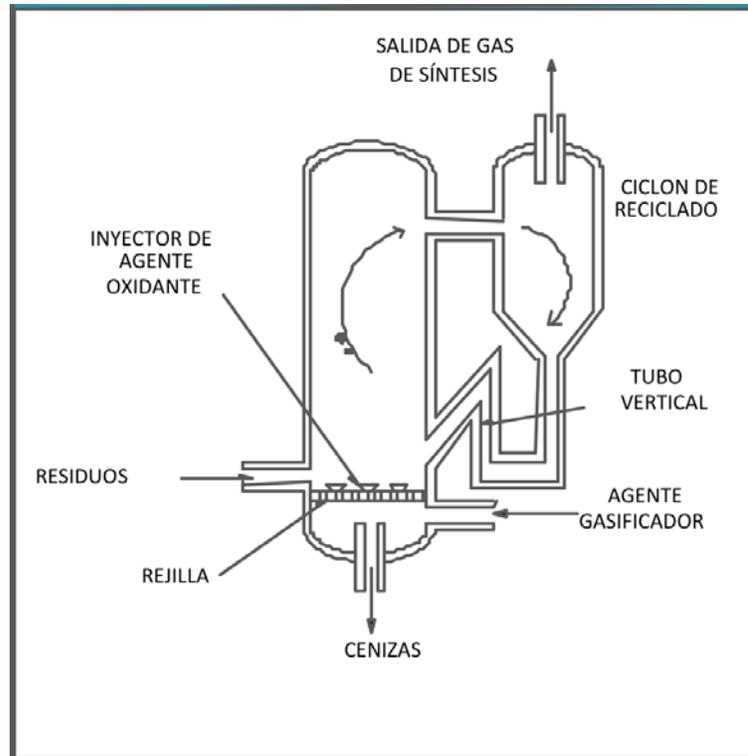


Figura 14. Gasificador de lecho fluidizado circulante (Sunggyu Lee 2007).

La tecnología de gasificación comercial para RSU EBARA reporta que la alimentación debe contar con un poder calorífico inferior en un intervalo de entre 7.5 y 14.3 MJ/kg (EBARA 2007). En general, se reporta que para gasificar residuos se requiere un poder calorífico inferior de 7 MJ/kg (Higman 2003).

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 49 de 100	

6. METODOLOGÍA

El resumen de la metodología a seguir se aprecia en la siguiente figura, este trabajo plantea un modelo para la gasificación de RSU y un caso de estudio aplicado a los RSU del Distrito Federal por lo que comprende de varias etapas que inician en la caracterización de los RSU del Distrito Federal por medio del muestreo puntual de los RSU en las 13 estaciones de transferencia. El cálculo de balance de materia y energía por medio de simulación permite dimensionar los equipos principales del proceso para realizar una estimación de costo de inversión. El desarrollo de este proyecto se llevó a cabo en gabinete esencialmente y entre sus actividades se encuentran el análisis de información, consultas a proveedores, evaluación técnica y el desarrollo de la propuesta como se aprecia en la siguiente figura.

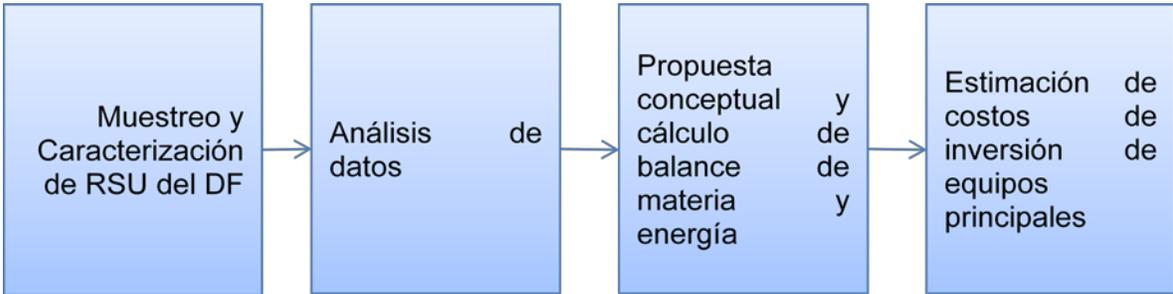


Figura 15. Diagrama de metodología de la tesis.

Una actividad central en la metodología de este trabajo es la caracterización de la corriente de residuos por medio del muestreo puntual de los RSU del Distrito Federal en las 13 estaciones de transferencia. La corriente de interés del muestreo es la que va desde las estaciones de transferencia al relleno sanitario porque es un flujo grande de residuos y puede ser susceptible de valorización o tratamiento. Este muestreo es puntual por que se obtuvo una sola campaña de muestreo en donde se tomó una muestra por cada estación durante el mes de diciembre de 2009. En este proyecto, el muestreo es útil para proveer datos de entrada para el diseño.

El sitio de muestreo fue determinado en cada estación con base a su infraestructura y condiciones de operación, incluso se realizaron visitas previas de reconocimiento y entrevistas en cada estación de transferencia (Garcés 2010). Este muestreo tomó como base las Normas Mexicanas, sin embargo se aplicaron con algunas adaptaciones ya que

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 50 de 100	

estas se enfocan a la caracterización y cuantificación de los residuos de la fuente de generación específica de casas habitación. Este muestreo se lleva a cabo en una corriente de interés diferente a la fuente de generación ya que estos se encuentran en la etapa de transporte al destino final.

El muestreo se realiza en dos etapas, la primera fue en campo con la recolección de una muestra compuesta, homogenización, determinación de peso volumétrico y de subproductos con base al peso. La segunda etapa consistió en los análisis de laboratorio correspondientes.

La variación en la composición de los residuos a través del tiempo es muy alta, esta variación se debe a la estación del año o al nivel socioeconómico entre otros factores. Sin embargo, para justificar la representatividad del muestreo, el tamaño de muestra se definió con base en la Norma ASTM D5231-92 "Método de prueba estándar para la determinación de la composición de residuos sólidos municipales sin procesar" y la elección de los camiones se realizó con un método aleatorio. El tamaño de muestra calculado con parámetros estadísticos fue de 15 muestras. Es decir, de cada estación de transferencia se seleccionan 15 camiones recolectores con un método aleatorio en función de la cantidad total que arriba diariamente a cada estación. De cada camión recolector se retira una cantidad de residuos máxima de 50 kg con herramientas y se transporta al área de trabajo donde se reúne la muestra compuesta con un peso promedio aproximado de 500 kg (Garcés 2010). En cada estación se acondicionó el sitio de trabajo, se seleccionaron los 15 vehículos, se entrevistó a los choferes y se tomaba la muestra de cada vehículo. Una vez realizada la muestra compuesta, se realizaba el método de cuarteo, se determinaba el peso volumétrico de los RSU y su caracterización en porcentaje peso de cada componente. De igual forma, se preparaba la muestra para el análisis de laboratorio y se realizaba la limpieza del área de trabajo.

Las actividades de homogenización, y la determinación de subproductos se basaron en las Normas Mexicanas NMX-AA-015-1985 y NMX-AA-022-1984 respectivamente. Es importante mencionar que se usó como base la lista de subproductos que se indica en la Norma NMX-AA-022-1984, sin embargo se realizaron adaptaciones para incluir la mayor cantidad de clases de residuos.

El peso volumétrico de los residuos se determinó en campo aplicando la Norma Mexicana NMX-AA-019-1985 principalmente. El resto de determinaciones se realizaron en el laboratorio y se presentan en la siguiente figura. La información de la siguiente figura clasifica las características de los RSU en características físicas y químicas con base en la literatura (Tchobanoglous 1994).

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 51 de 100

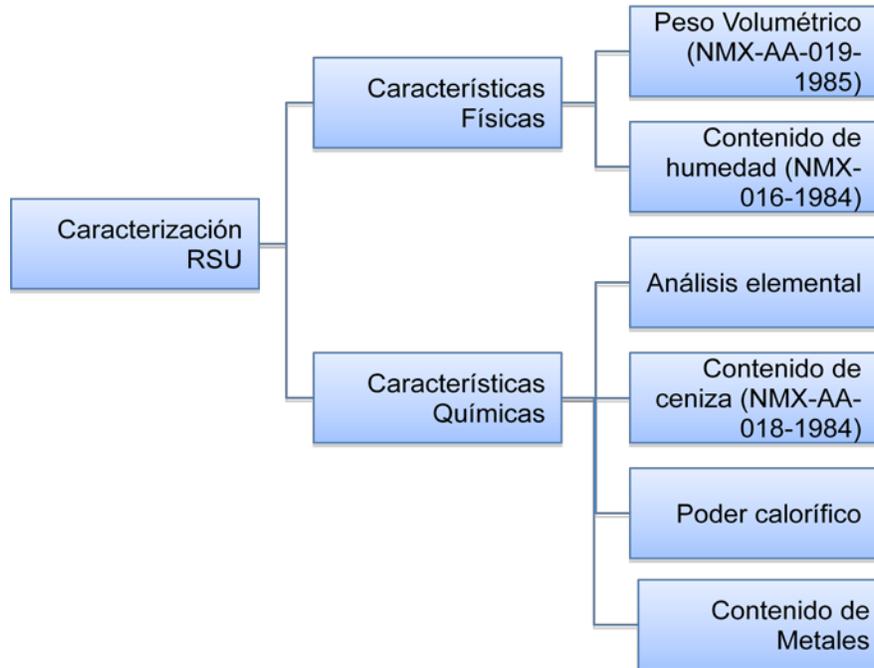


Figura 16. Caracterización de RSU de las estaciones de transferencia del Distrito Federal.

La caracterización incluye la determinación de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre llevado a cabo en un equipo de análisis elemental modelo EA/NA1110 de la marca Fison, el cual basa su funcionamiento en la combustión de la muestra a 1,000 °C, en una atmósfera de oxígeno, y el equipo cuantifica en porcentaje másico de los componentes mediante la determinación de los gases de combustión: CO₂, H₂O y N₂.

Se determinó el contenido de metales pesados por medio de espectrometría de absorción atómica. Para aplicar este método se realizó una digestión ácida de la muestra (0.5 g) con HNO₃ concentrado, HCl concentrado y H₂O₂ al 30%. En seguida se completó la digestión con un equipo de microondas marca Milestone modelo mls 1,200 mega a diferentes potencias. El equipo de espectrometría de absorción atómica es de la marca Perkin Elmer, modelo Aanalyst 700. Se utilizó un estándar y una lámpara para cada componente a determinar de la marca Perkin Elmer. Se analizaron los metales Pb, Cu, Zn, Mn, Hg, As y Cr.

La energía almacenada en los enlaces químicos de un material que se libera en una reacción de combustión se conoce como calor de combustión el cual se puede determinar

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 52 de 100	

experimentalmente o con diferentes fórmulas reportadas en la literatura dependiente del contenido de humedad y del análisis elemental del material sólido combustible a caracterizar. En este estudio el calor de combustión de los RSU se determinó para caracterizarlo por medio de un calorímetro de la marca METTLER TOLEDO®, modelo DSC 1 el cual se muestra en la siguiente fotografía.



Figura 17. Fotografía del calorímetro DSC-1

El calorímetro DSC 1 trabaja calentando de 3 a 5 mg de la muestra en crisoles de aluminio de 40 microlitros hasta una temperatura máxima de 500°C, con un flujo de oxígeno y una tasa de calentamiento constantes. El aparato mide temperatura y proporciona el valor de la energía aplicada a la muestra para elevar su temperatura. Estos resultados se aprecian en un termograma en el cual se grafica la potencia específica suministrada a la muestra en W/g contra temperatura o tiempo. A través de un módulo matemático de integración se determina el calor de combustión de la muestra. Es importante relacionar el termograma con los restos que la muestra deja después del proceso de calentamiento. Los restos típicos de la muestra de RSU son cenizas blancas. La figura 18 es un ejemplo de termograma, en él se puede observar que las curvas cóncavas representan consumo de

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 53 de 100	

energía y representan una reacción o un fenómeno endotérmico y las convexas reacciones o fenómenos exotérmicos que liberan energía.

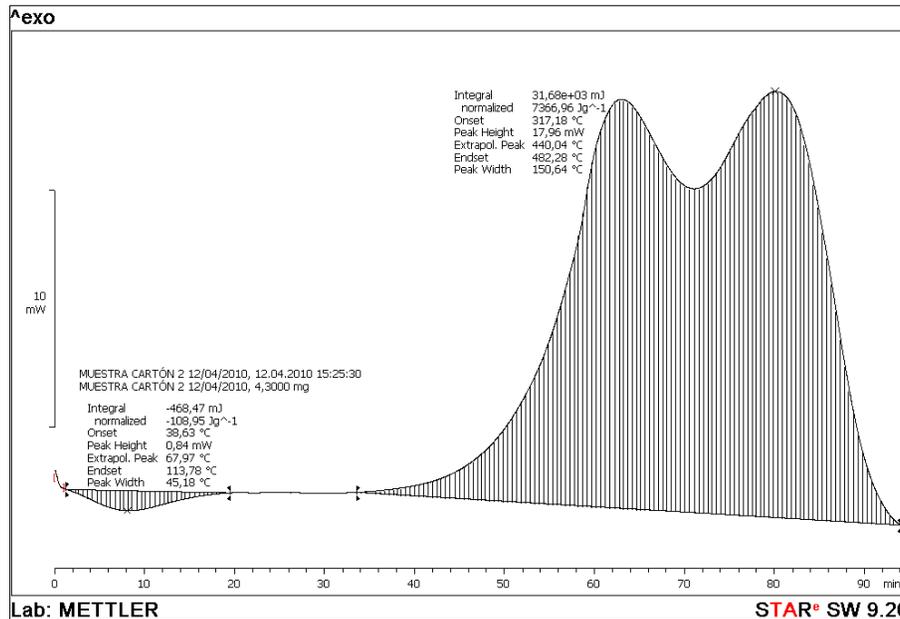


Figura 18. Termograma de la combustión de una muestra de cartón.

Las muestras de interés son los RSU pulverizados por medio de una trituración hasta polvo. Los RSU de la muestra a analizar se encuentran secos y provienen de cada una de las trece estaciones de transferencia del Distrito Federal. La naturaleza de la muestra es heterogénea y sus termogramas tienen cierta variación entre ellos. En general, el proceso de combustión en todas ellas inicia con una curva endotérmica que corresponde a la evaporación de la poca humedad contenida en la muestra. Se realizó la optimización del método para analizar las muestras, las condiciones de operación disponibles para la variación fueron la tasa de calentamiento y el flujo de agente oxidante.

Una vez caracterizados los residuos, y definida la tecnología de gasificación por medio de lecho fluidizado circulante, se optó por un modelo de caja negra válido únicamente para evaluar la composición y el flujo del gas de síntesis (Gómez-Barea 2010). El caso de estudio de los RSU del Distrito Federal es complejo y requiere de un conjunto de métodos de valoración y disposición final que sea integral, donde se incluyan tratamientos a la fracción orgánica y reciclaje de la mayoría de materiales contenidos en los RSU. Actualmente, la separación de residuos en origen es baja, es por eso que se evaluará esta

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 54 de 100	

opción usando residuos mezclados que pasan por un proceso mecánico-manual de recuperación de materiales con el que se remueven de la corriente el material apto para reciclaje. Después de que los residuos mezclados pasan por esta etapa, se considera que se deben dirigir al tratamiento de gasificación. En la gasificación, los resultados son mejores mientras la alimentación esté constituida únicamente por papel, madera, cartón, plástico y textiles (European Commision - Directorate General Environment 2003).

Una vez definido el tren desde la entrada de residuos hasta la salida del gas de síntesis se seleccionó el mejor sistema para la generación de energía eléctrica y el tren de lavado de gases a la salida de la gasificación. El resultado de este procedimiento de selección fue un diagrama de flujo con los equipos principales para la gasificación de los residuos del Distrito Federal integrado a un sistema de generación de energía eléctrica.

Con esta información se determinaron las capacidades requeridas del equipo y será posible llevar a cabo una estimación del costo de inversión. El costo de inversión se determinó por medio de la información disponible tanto de los proveedores de tecnología como en la literatura especializada en los tratamientos térmicos de RSU.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 55 de 100	

7. RESULTADOS

7.1 Muestreo Puntual y Caracterización de RSU del Caso de Estudio

Para considerar cualquier estrategia de tratamiento de los RSU, es necesario caracterizar la corriente de residuos de la corriente a tratar. La caracterización de los RSU se puede realizar por medio de muestreo y metodologías por flujo de materiales (Tchobanoglous 2002).

El caso de estudio para este trabajo se basará en un muestreo realizado en el invierno de 2009 de caracterización de RSU del Distrito Federal en las trece estaciones de transferencia, este muestreo se llevó a cabo en conjunto con Garcés (2010). En la siguiente fotografía se observa la actividad de clasificación de subproductos durante el muestreo.



Figura 19. Fotografía de la determinación de subproductos en la Estación de Transferencia Tlalpan.

El muestreo se realizó en dos etapas, una en campo y otra en laboratorio. En campo se determinó la composición de materiales o subproductos, el peso volumétrico y la toma de

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 56 de 100	

muestras, las cuales fueron preservadas en refrigeración y analizadas para determinar las características físicas y químicas de los RSU del Distrito Federal, con base en Normas Mexicanas principalmente.

7.1.1 Características Físicas

La determinación de subproductos indica que casi el 50% de los residuos son orgánicos, es decir, restos de comida o jardín. Esta fracción tiene opciones de tratamiento preferenciales como composta o digestión anaerobia. Sin embargo, también pueden llegar a ser parte de la alimentación de un tratamiento térmico con el uso de dispositivos de secado o de mezclas con materiales con mayor poder calorífico como el carbón. En el tratamiento de la corriente de residuos mezclados se debe considerar la aplicación de otras estrategias adicionales a la gasificación, tales como el reciclaje de materiales. El 27% de los residuos puede ser manejado como combustible derivado de RSU. La determinación de subproductos también es útil para estimar el contenido energético de los residuos. Los resultados de la determinación de subproductos de los RSU de las 13 estaciones de transferencia del Distrito Federal se encuentran en la tabla 10 y en el anexo 1. Es importante mencionar que los datos presentados en estas tablas son promedios ponderados en base a los flujos máxicos de las estaciones de transferencia. En la tabla 10 se incluyen los datos reportados por el Gobierno del Distrito Federal del 2010, se encontró que existen diferencias de valores desde 1 a 300%. Se concluye que los resultados no son comparables ya que se obtuvieron con diferentes metodologías. Las normas mexicanas se refieren a la determinación de subproductos en la fuente de generación (casas habitación) y ambas determinaciones, la de este trabajo y la del Gobierno del Distrito Federal se realizaron en las estaciones de transferencia con adaptaciones a la normatividad.

Las propiedades físicas de peso volumétrico y humedad se encuentran en la tabla 11. El valor promedio del porcentaje de humedad tomando en cuenta los flujos de cada estación de transferencia es de 33.7%. El valor promedio ponderado de peso volumétrico de los residuos es de 185.9 kg/m³.

Conocer el peso volumétrico de los residuos es útil principalmente para diseñar dispositivos de almacenamiento y transporte. El contenido de humedad en los residuos es un factor clave en el diseño de sistemas de gasificación debido a que un contenido alto de humedad influye en el valor del poder calorífico de los residuos. El valor de humedad promedio de los RSU del Distrito Federal es superior a cualquier valor de humedad reportado para combustible para gasificación, por lo que es necesario considerar un sistema de secado (Higman 2003).

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 57 de 100

Tabla 10. Composición en % peso de subproductos (Garcés 2010).

Categoría	Subproducto	% peso	% total	% peso ^b	% total ^b
Plásticos	Plástico N-1 PET	1.21	13.16	2.8	13.21
	Plástico N-2 PEAD	1.2		2.92	
	Plástico N-3 PVC	0.17		0.15	
	Plástico N-4	0.43		5.44	
	Plástico N-5	0.84		0.92	
	Plástico N-6	0.58		0.98	
	Plástico N-7	0.85		0	
	Bolsa de plástico	6.46		NA	
Textiles	Poliestireno Expandido (unicel)	1.42	3.64	2.94	2.94
Orgánicos	Residuos orgánicos	49.5	49.5	44.05	44.05
Residuos Sanitarios	Papel sanitario	5.72	10.77	6.72	9.55
	Pañal desechable y toallas sanitarias	5.05		2.83	
Papel	Papel de impresión	1.76	5.89	2.09	4.4
	Papel de revista	0.79		0.63	
	Papel encerado	0.44		NA	
	Periódico	1.82		1.68	
	Otros Papeles	1.08		NA	
Cartón	Cartón	2.93	4.03	6.36	7.87
	Tetra pack	1.1		1.51	
Residuos peligrosos	Residuos peligrosos	0.13	0.18	NA	NA
	Biológico infecciosos	0.05		NA	
Residuos de manejo especial	Residuos especiales (pilas, llantas, materiales punzo y cortantes)	1.41	3.29	1.09	2.84
	Material de construcción	1.88		1.75	
Material ferroso	Material ferroso	1.16	1.16	0.37	0.37
Madera	Madera	0.45	0.45	1.95	1.95
Residuo finos	Residuo finos	0.8	0.8	2.68	2.68
Aluminio	Lata de aluminio	0.2	0.29	0.07	0.07
	Papel aluminio	0.09		NA	
Vidrio	Vidrio de color	0.72	2.65	0.74	2.48

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 58 de 100

Categoría	Subproducto	% peso	% total	% peso ^b	% total ^b
	Vidrio transparente	1.93		1.74	
Otros	Otros	3.12	4.19	6.62	7.59
	Zapatos	0.35		0.44	
	Loza y cerámica	0.72		0.53	

b = Fuente: (Gobierno del Distrito Federal 2010)

Tabla 11. Peso volumétrico y humedad de los RSU de las estaciones de transferencia del Distrito Federal (Garcés 2010).

Estación de Transferencia	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Humedad (% peso)
Tlalpan	192.9	31.84
Milpa alta	160.0	38.42
Benito Juárez	182.4	14.6
Miguel Hidalgo	200.3	20.72
Venustiano Carranza	201.4	27.1
Iztapalapa I	232.3	36.64
Iztapalapa II	288.0	24.82
Álvaro Obregón	145.7	38.41
Azcapotzalco	146.1	27.52
Xochimilco	145.7	30.8
Coyoacán	152.4	38.47
G.A.M.	166.9	39.62
Cuauhtémoc	147.7	36.45

7.1.2 Características Químicas

Las propiedades químicas de composición elemental y contenido de cenizas en base seca se encuentran en la tabla 12.

El contenido de cenizas es esencial para el diseño de gasificación ya que es una referencia de la cantidad de residuos a disponer en un relleno sanitario. El contenido de ceniza y del análisis elemental promedio de los RSU del Distrito Federal son comparables con el intervalo reportado para combustibles de gasificadores de lecho fluidizado. En general, los

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 59 de 100

valores del análisis elemental promedio se encuentran dentro del intervalo de los combustibles de gasificadores de lecho fluidizado circulante a excepción del azufre, que es un elemento típico en los combustibles en un valor aproximado del 2% (Higman 2003). El contenido de azufre y nitrógeno son importantes para diseñar la limpieza de gases y evitar la emisión de gases contaminantes.

Tabla 12. Contenido de cenizas en % peso y análisis elemental en % peso de los RSU de las estaciones de transferencia del Distrito Federal (Garcés 2010).

Estación de Transferencia	% peso Carbón	% peso Hidrógeno	% peso Oxígeno	% peso Nitrógeno	% peso Azufre	% peso Cenizas
Álvaro Obregón	63.29	10.85	3.54	7.77	ND	14.54
Azcapotzalco	66.23	16.63	3.22	0.82	ND	13.09
Benito Juárez	75.46	14.92	1.24	1.58	ND	6.79
Coyoacán	50.43	21.06	16.04	1.9	ND	10.56
Cuauhtémoc	32.93	1.65	53.92	0.04	ND	11.45
Gustavo A. Madero	59.86	13.89	9.68	0.76	ND	15.8
Iztapalapa I	64.28	19.71	0.64	4.03	0.19	11.15
Iztapalapa 2	57.89	16.93	0.91	6.79	ND	17.47
Miguel Hidalgo	61.01	13.88	7.74	2.69	ND	14.67
Milpa Alta	63.28	17.49	2.67	1.87	ND	14.68
Tlalpan	60.35	12.64	13.82	1.83	ND	11.36
Venustiano Carranza	55.48	19.17	11.88	0.86	ND	12.61
Xochimilco	64.79	14.88	6.13	0.83	ND	13.36
Promedio ponderado	61.16	15.2	7.45	2.92	0.02	13.04

Los resultados obtenidos de la determinación de calor de combustión se pueden observar en la siguiente tabla donde se menciona la estación de transferencia de donde proviene la muestra, los valores promedio de calor de combustión obtenidos por triplicado para cada muestra, desviación estándar y coeficiente de variación.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 60 de 100	

Tabla 13. Análisis de calor de combustión de los RSU de las estaciones de transferencia del Distrito Federal.

Estación de Transferencia	Promedio (kJ/kg)	Desv. Stdr.	%Var.
Alvaro Obregón	10,342.00	522.22	5.05
Azcapotzalco	11,090.00	632.30	5.70
Benito Juárez	12,203.33	1124.79	4.28
Coyoacán	10,743.33	420.26	3.91
Cuahutemoc	10,043.33	202.04	2.01
G.A.M.	9,654.70	246.66	2.55
Iztapalapa I	10,700.00	269.94	2.52
Iztapalapa II	11,430.00	332.37	2.91
Miguel Hidalgo	14,006.67	294.09	2.10
Milpa Alta	9,525.38	344.68	3.62
Tlapan	11,500.00	868.83	7.56
Venustiano Carranza	9,651.30	1102.99	4.53
Xochimilco	12,023.33	1430.95	4.20

El coeficiente de variación es un parámetro que resulta de dividir la desviación estándar entre la media, expresado en porcentaje. Este estadístico descriptivo indica cuán grande es la desviación estándar en relación con la media y es útil para comparar la variabilidad de variables con desviaciones estándar medias distintas (Anderson 2008). Como se puede observar los datos tienen un coeficiente de variación menor a 6%.

Es importante mencionar que los valores de calor de combustión obtenidos equivalen al concepto de poder calorífico superior ya que la integración se realiza en la parte exotérmica de la curva sin tomar en cuenta la endotérmica. En la siguiente figura se puede observar un ejemplo de la comparación entre dos termogramas de la misma muestra (No. 8 de la Estación de Transferencia Miguel Hidalgo).

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 61 de 100	

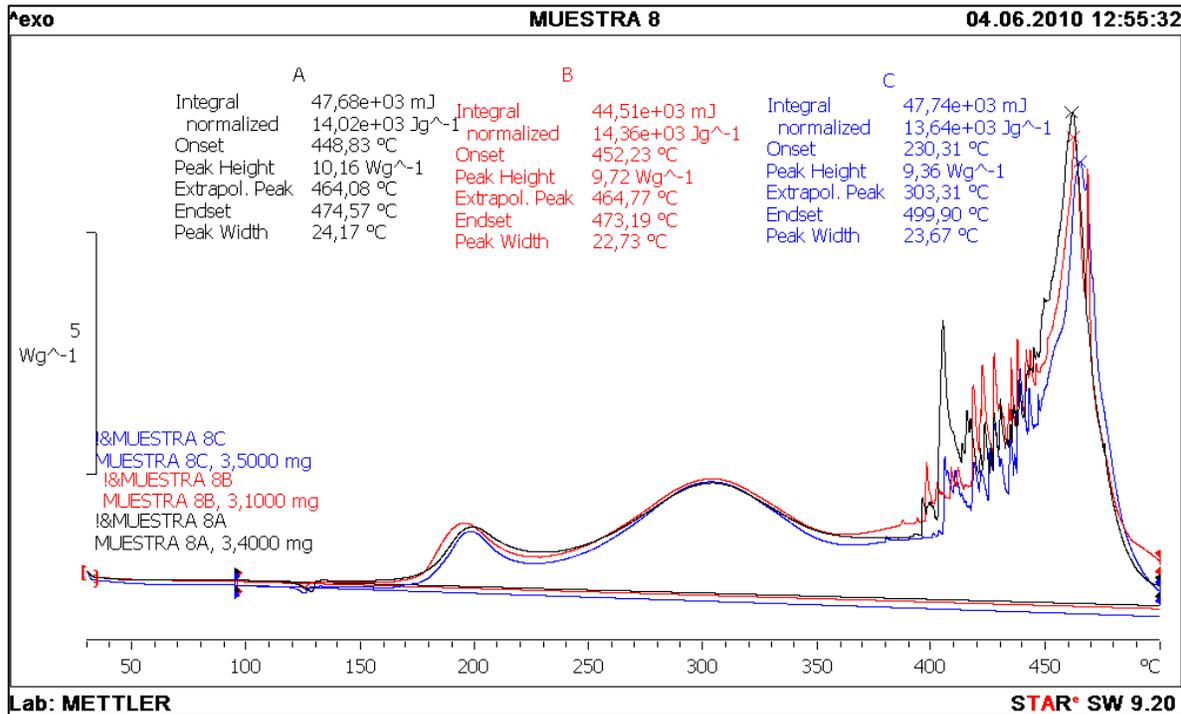


Figura 20. Termogramas sobrepuestos de la muestra 8 de la Estación de Transferencia Miguel Hidalgo.

Se obtuvo un promedio ponderado con relación a los flujos de cada estación de transferencia y se obtuvo un poder calorífico superior (PCS) para los RSU sin separación en fuente del Distrito Federal de 10.922 MJ/kg. Se realizó una aproximación para el poder calorífico inferior (PCI) por medio de la siguiente fórmula (Pichtel 2005):

$$PCI \text{ (MJ/kg)} = PCS \text{ (MJ/kg)} - 0.0244(A + 9H) \quad (1)$$

Donde A y H son los porcentajes masa de agua e hidrógeno contenidos en los residuos. Usando valores promedio se tiene que el PCI de los RSU del DF es de 6.7 MJ/kg.

Se tiene un valor promedio de 10.089 MJ/kg por medio del cálculo con el método de Tchobanoglous para el cálculo del contenido energético de los residuos cuando son desechados, es decir, húmedos. En la siguiente tabla se observan los datos usados.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 62 de 100	

Tabla 14. Cálculo del Poder Calorífico de los RSU de las estaciones de transferencia del Distrito Federal.

Categoría	kg	kcal/kg (Tchobanoglous, 1994)	kcal
Plásticos	13.16	7777.84	102356.37
Textiles (natural y sintético)	3.64	4166.7	15166.79
Residuos orgánicos	49.5	1111.12	55000.44
Papel sanitario	5.72	4000.03	22880.17
Pañal desechable y toallas sanitarias	5.05	573.6 (BifA GbH 1995)	2896.68
Papel	5.89	4000.03	23560.18
Cartón	4.03	3888.92	15672.35
Residuos peligrosos	0.18	-	-
Residuos de manejo especial	1.41	-	-
Material de construcción	1.88	-	-
Material ferroso	1.16	166.67	193.34
Madera	0.45	4444.48	2000.02
Residuo finos	0.8	1666.68	1333.34
Aluminio	0.29	-	-
Vidrio	2.65	33.33	88.32
Otros	4.19	-	-

Con los contenidos de C,H,O,N y S típicos de cada tipo de residuo reportados por Tchobanoglous (2002) y la ecuación reportada en la literatura da un PCI de 19.41MJ/kg (Pichtel 2005). Este método de cálculo se utilizará en el balance de energía del pretratamiento, debido a que le puede dar seguimiento a todas las corrientes a diferencia del método experimental. Como se puede observar, existe una gran variedad de métodos para el cálculo de la energía contenida en los residuos y en la mayoría el poder calorífico supera o se acerca al valor mínimo sugerido en la literatura para gasificar combustibles de 7 MJ/kg (Higman 2003). En los casos en que el PCI es inferior a este valor, se puede considerar el secado del tratamiento previo para alcanzar un poder calorífico mayor. Para caracterizar los residuos en el balance de materia se usará el poder calorífico obtenido a partir del método planteado por Tchobanoglous.

Se determinaron los metales pesados en las muestras de los RSU de las estaciones de transferencia, los resultados se muestran a continuación:

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO Facultad de Química
--	---

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 63 de 100	

Tabla 15. Caracterización de metales pesados en mg/kg_{RSU}.

Estación de Transferencia	Pb	Cu	Zn	Mn	Hg	As	Cr
Alvaro Obregón	86.88	15.06	117.61	42.93	0.84	0.35	39.86
Azcapotzalco	171.48	30.75	156.30	57.32	0.92	0.00	99.31
Benito Juárez	82.98	38.05	86.33	41.65	0.84	1.01	60.95
Coyoacán	28.66	15.04	94.47	100.36	0.69	0.18	144.87
Cuauhtémoc	35.65	38.04	506.74	50.39	2.11	0.27	16.95
Gustavo A. Madero	28.13	27.58	14.08	54.14	0.92	0.40	17.49
Miguel Hidalgo	147.96	27.60	288.62	160.14	0.92	0.40	12.66
Milpa Alta	124.98	422.00	539.15	3299.51	2.41	0.61	56.56
Iztapalapa I	37.72	15.04	435.84	40.36	1.51	0.13	47.42
Iztapalapa II	26.69	24.45	76.39	100.42	3.08	0.74	89.84
Tlalpan	132.82	26.07	291.45	27.83	1.46	0.92	56.45
Venustiano Carranza	26.07	18.19	241.78	52.90	0.84	0.18	14.06
Xochimilco	43.37	30.72	109.21	47.88	1.29	0.40	49.25
Promedio ponderado	85.00	72.13	245.87	456.86	1.24	0.35	56.40

La cantidad de metales pesados en los RSU del Distrito Federal se encuentra en cantidades relativamente bajas, no se encontraron reportes de contenido de metales en RSU. Como comparación, las concentraciones promedio ponderadas para todos los metales son menores que las concentraciones de metales pasados de la ceniza proveniente de un proceso de incineración en China (De-Zhi 2007). Estos elementos se encuentran en los residuos como resultado de baterías, electrónicos, cerámicas, bulbos de luz o pintura. Los metales pesados arsénico, cobre, cromo, mercurio, plomo, zinc y manganeso son peligrosos para la salud a ciertas concentraciones, por lo que en un sistema de gasificación de residuos se deben tomar en cuenta para su diseño. Conocer el contenido de los metales en las muestras de residuos es útil para estimar su distribución de estos componentes en el balance de materia de la gasificación. Las emisiones de metales pesados tienen una fuerte dependencia en parámetros de operación, composición en la entrada y el desempeño de los dispositivos de lavado de gas. Existe normatividad para regular la emisión de contaminantes en el aire y la caracterización de cenizas como residuos peligrosos.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 64 de 100	

7.2 Diseño del Proceso del Caso de Estudio

La gasificación puede ser aplicada para residuos de biomasa secos o combustible derivado de residuos (CDR). En este capítulo, la gasificación de residuos se estudiaron por medio de un modelo de caja negra a través de la simulación con el programa ASPEN Plus, con este modelo se determinó la cantidad y composición de gas de síntesis a ciertas condiciones a partir de la alimentación del caso de estudio. El análisis se realizó tomando en cuenta las características obtenidas en el muestreo.

La cantidad y las características de los residuos actualmente los hacen candidatos a tratamiento térmico y valorización por medio de otras estrategias diferentes al relleno sanitario por lo que en el presente trabajo se consideró una fracción de la corriente de residuos de interés la cual consta de los residuos con características promedio de aquellos que salen de las 13 estaciones de transferencia y que se transportan al relleno sanitario Bordo Poniente. Esta fracción consta de un flujo máximo de 550 toneladas/día de RSU mezclados que deben pasar primero por un proceso de remoción de materiales reciclables. El proceso de remoción de materiales reciclables se determinó con base en reportes del material recuperado en las plantas de recuperación del Distrito Federal (Tijera, 2007). En seguida el material pasa por un tratamiento previo para la producción de CDR que sirve como alimentación del gasificador. Se determinaron las condiciones de operación del gasificador por medio de una simulación de procesos para obtener la cantidad y composición del gas de síntesis. Se definió una limpieza de gas de síntesis y un sistema de generación de energía eléctrica para el caso de estudio.

7.2.1 Sistema de Tratamiento Previo para el Caso de Estudio

El tratamiento previo consta de dos etapas, en la primera se aplica la estrategia de manejo integral de residuos sólidos urbanos de reciclaje o reuso de materiales por medio de la recuperación en bandas de separación manual y dispositivos de separación de metales. En la segunda etapa se produce CDR que incluye un proceso de trituración y secado. En el caso de que los residuos tuvieran una separación en origen como lo marca la Ley de Residuos del DF en residuos orgánicos e inorgánicos, especiales y peligrosos se podría considerar una alimentación a gasificación de residuos de biomasa secos o un CDR compuesto principalmente de papel, cartón, madera, plásticos y textiles.

Como flujo base de entrada de residuos a la planta se considerarán 550 toneladas/día como flujo máximo en una sola línea de proceso para el diseño. La capacidad se basa en el flujo máximo reportado en un proceso de gasificación por medio de un gasificador de

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 65 de 100	

lecho fluidizado (Higman 2003). La capacidad nominal sea de 500 toneladas/día con un factor de seguridad de 1.1. La composición de los RSU fue obtenida del muestreo puntual (Tablas 10 y 15). Se realizan las siguientes consideraciones:

- Los RSU que entran al proceso deben almacenarse evitando el contacto con agua.
- Remoción manual de materiales de reciclaje del 10% compuesto por plásticos, textiles, papel, madera y cartón.
- Remoción de metales ferrosos y no ferrosos.
- Los metales pesados se remueven por medio de las cenizas y en sistemas de control de contaminación del aire.
- Producción de CDR por medio de secado y trituración.
- El CDR debe tener una humedad máxima del 30%, un tamaño de partícula menor a 5 cm y un poder calorífico inferior mínimo de 7 MJ/kg.
- La caracterización de poder calorífico de los RSU se toma de las ecuaciones de la literatura (Pichtel 2005).

7.2.1.1 Operaciones Unitarias del Sistema de Tratamiento Previo del Caso de Estudio

En la siguiente tabla se observa una lista de los equipos de la primera etapa de tratamiento previo para recuperación de materiales en un tren con capacidad máxima de 550 toneladas/día. El tren consta de una banda de alimentación, una criba tromel, una banda de separación manual y un separador de metales eddy current. Los productos principales de esta etapa son los materiales reciclables separados, materiales para producir combustible derivado de residuos y el servicio auxiliar requerido es energía eléctrica.

La siguiente etapa de tratamiento previo es la producción de CDR, por medio de la trituración y secado de los residuos. En la literatura se encontró que los residuos con cierto grado de separación en el origen también se pueden tratar por medio de procesos mecánicos-biológicos donde los residuos primero reciben tratamiento biológico, en seguida se separan por medios mecánicos y en ocasiones también se utiliza el secado

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 66 de 100	

(European Commission - Directorate General Environment 2003). De igual forma, se puede aplicar otro proceso como la trituración y separación por medio de aire, donde la fracción ligera se usa como CDR, sin embargo este proceso tiene una eficiencia baja cuando los residuos no se separan en origen (Tchobanoglous, Gestion Integral de los Residuos Sólidos 1994). De igual forma se encuentra reportado un tratamiento biológico, separación de metales, clasificación por medio de aire y triturado (Giugliano 2008).

Tabla 16. Equipos de la primera etapa de tratamiento de los RSU.

Operación	No. De Equipos	Características	Referencias
Banda de alimentación	1	<ul style="list-style-type: none"> Consumo energético: 58 HP para una banda de 10x1.1 metros que transporta los residuos a una altura de 2.5 metros, a una velocidad de 0.5 m/s. Los residuos tienen una altura sobre la banda de 6 cm considerando una densidad de 185.9 kg/m³. 	<ul style="list-style-type: none"> Tchobanoglous, 1994 Pichtel, 2005.
Tromel – Equipo para romper bolsas.	1	<ul style="list-style-type: none"> Consumo energético: 75 HP con las siguientes dimensiones: 18.7x1.85x3.42 metros. Rompedor de bolsas. Se separa material menor a 10 cm. La velocidad crítica es de 0.51 revoluciones/segundo. 	<ul style="list-style-type: none"> Tchobanoglous, 1994 Dove Equipment & Machinery Co. Ltd., 2008 UNEP, 2005
Bandas de separación manuales	1	<ul style="list-style-type: none"> Consumo energético: 1 HP para una banda de 50x1.1 metros. Eficiencia de remoción de materiales: 60%-95%. 	<ul style="list-style-type: none"> Tchobanoglous, 1994
Separadores de Eddy Current	1	<ul style="list-style-type: none"> Eficiencia de Separación de metales: 98%. Requerimiento Energético: 2.42 HP. 	<ul style="list-style-type: none"> Tchobanoglous, 2002 Caputo, 2002

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 67 de 100	

Los objetivos de las operaciones de la segunda etapa son disminuir el tamaño de partícula y secar los residuos. El secado se ha encontrado en otros procesos de gasificación de RSU, sin embargo no se reportan eficiencias (Thermoselect 2011). Los servicios auxiliares requeridos para esta etapa son energía eléctrica y aire caliente. Las características de los equipos se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 17. Características principales de la segunda etapa de tratamiento previo.

Operación	No. De Equipos	Características	Referencias
Triturador	2	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad: 275 toneladas/día por cada triturador. • Consumo energético total: 741.4 HP. • Tipo: Molino triturador de martillos. • Tamaño de partícula requerido: 5 cm. • Tamaño inicial de partícula: 50 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tchobanoglous, 1994 • UNEP, 2005 • Jeffrey Specialty Equipment, 2010
Criba Vibratoria	2	<ul style="list-style-type: none"> • Aproximadamente 30.7% del material triturado es retenido. • Capacidad: 250 toneladas/día. • Consumo energético: 20 HP/Criba. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tchobanoglous, 1994 • Shangai Machinery Co. Ltd., 2010
Secador directo Rotatorio con gas natural	1	<ul style="list-style-type: none"> • Secado con aire caliente a 200°C – 650°C. • Consumo energético total: 9,950 HP. • Eficiencia de secado: 70%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vandenbroek International, 2010

En el siguiente diagrama se observa el proceso del tratamiento previo que tiene una capacidad máxima de 550 toneladas/día y la lista de equipos del tratamiento previo también se incluye en la siguiente tabla.

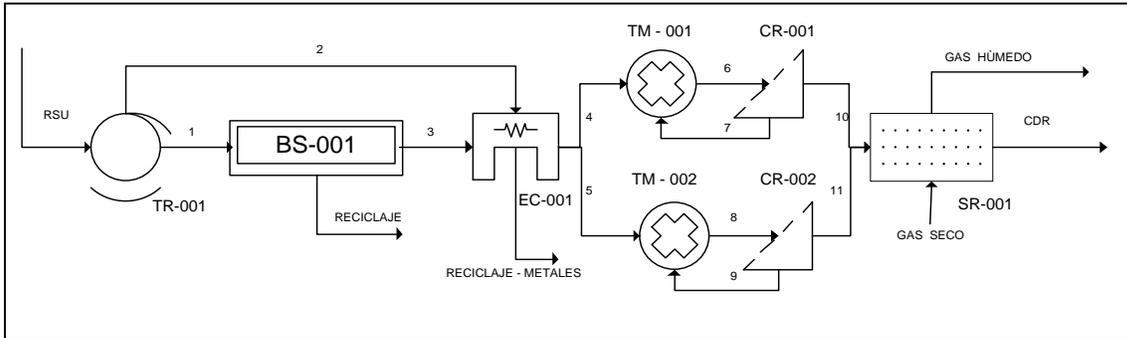


Figura 21. Diagrama del tratamiento previo

Tabla 18. Lista de Equipos del tratamiento previo

Etiqueta mostrada	Descripción
BS-001	Banda Transportadora para selección manual
CR-001 y CR-002	Cribas Vibratoria
EC-001	Separador Eddy Current
SR-001	Secador Rotatorio
TM-001 y TM-002	Tromel
TR-001	Trituradoras de Martillo

7.2.1.2 Balance de Materia y Energía del Tratamiento Previo del Caso de Estudio

A continuación se observa en la tabla 19 el balance global de materia y energía del tren de tratamiento previo de RSU de las estaciones de transferencia del Distrito Federal

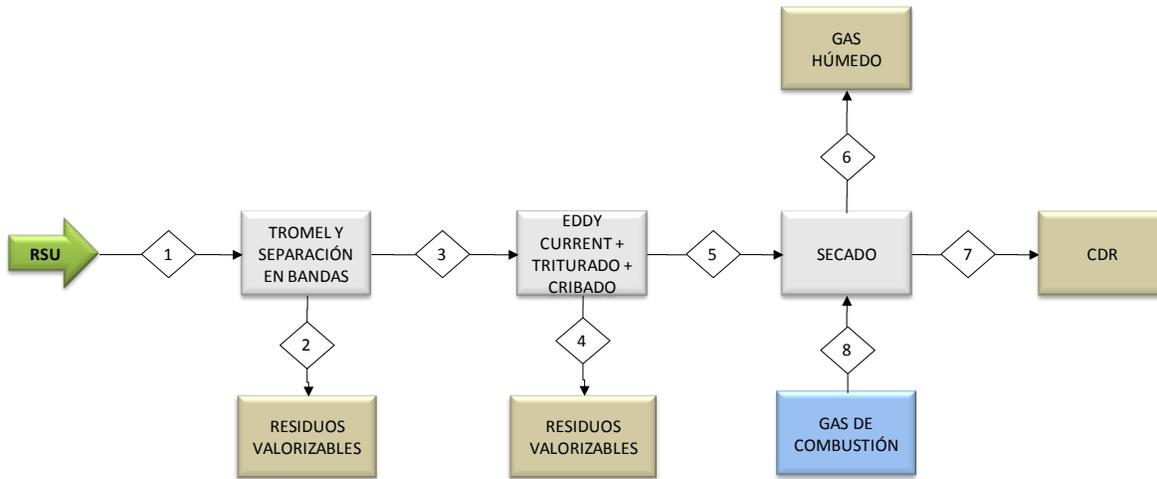


Figura 22. Diagrama de bloques del tratamiento previo

Tabla 19. Tabla de balance de materia y energía.

Nombre	Unidades	1	2	3	4	5	6	7	8
Flujo	ton/d	550	50.07	499.93	3.07	496.86	384.31	339.73	227.18
Presión	kg/cm ²	1.03	1.03	1.03	1	1.03	1.03	1.03	1.03
Temperatura	°C	25	25	25	25	25	100.00	100	200
Humedad	%	33.7	3.26	44.91	2.00	45.18	0.41	19.82	-
Poder calorífico superior (PCS)	MJ/kg	21.67	27.69	20.81	1.79	21.02	-	21.02	53.80
Poder calorífico inferior (PCI)	MJ/kg	19.41	25.86	18.33	1.61	18.52	-	19.14	48.62
Plásticos	ton/d	72.38	25.52	46.86	0.00	46.86	-	46.79	-
Textiles (natural y sintético)	ton/d	20.02	1.05	18.98	0	18.98	-	17.65	-
Residuos orgánicos	ton/d	272.25	0.00	272.25	0.00	272.25	-	138.85	-
Residuos Sanitarios	ton/d	59.24	0.00	59.24	0.00	59.24	-	41.43	-
Papel	ton/d	32.40	9.13	23.27	0.00	23.27	-	22.08	-
Cartón	ton/d	22.17	5.34	16.83	0.00	16.83	-	16.29	-
Residuos peligrosos	ton/d	0.99	0.00	0.99	0.00	0.99	-	0.86	-
Residuos de manejo especial	ton/d	18.10	0.02	18.07	0.00	18.07	-	18.07	-
Material ferroso	ton/d	6.38	4.79	1.60	1.56	0.03	-	0.03	-
Madera	ton/d	2.48	0.00	2.48	0.00	2.48	-	2.13	-
Residuo finos	ton/d	4.40	0.00	4.40	0.00	4.40	-	4.15	-
Aluminio	ton/d	1.60	0.06	1.54	1.51	0.03	-	0.03	-
Vidrio	ton/d	14.58	3.52	11.06	0.00	11.06	-	10.90	-
Otros	ton/d	23.05	0.66	22.39	0.00	22.39	-	20.46	-
Gas de combustión	ton/d	-	-	-	-	-	227.18	-	227.18
Pb	ton/d	0.05	-	0.05	-	0.05	-	0.05	-

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 70 de 100

Nombre	Unidades	1	2	3	4	5	6	7	8
Cu	ton/d	0.14	-	0.14	-	0.14	-	0.14	-
Zn	ton/d	0.03	-	0.03	-	0.03	-	0.03	-
Mn	ton/d	0.01	-	0.01	-	0.01	-	0.01	-
Hg	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
As	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
Cr	ton/d	0.03	-	0.03	-	0.03	-	0.03	-

7.2.1 Sistema de Gasificación del Caso de Estudio

Una vez que se conocen las características principales del combustible y del gasificador, se realizó una simulación de procesos en el programa Aspen Plus® para definir la composición y flujo de gas de síntesis que se obtiene.

7.2.2 Simulación del Proceso de Gasificación en Aspen Plus®

La simulación se lleva a cabo a través de módulos de cálculo y la predicción de propiedades termodinámicas y de transporte que permitan la evaluación y/u optimización de procesos. Los dos retos más importantes en una simulación son la elección del tipo de módulo de cálculo a utilizar y del método de predicción de propiedades.

El módulo secuencial de cálculo debe representar la operación unitaria de estudio y debe ser elegido con base en la información con que se cuenta acerca del proceso y del resultado que se desea conocer. En el caso de la simulación de la gasificación de RSU es interesante conocer un balance de materia y energía que permita conocer la composición del gas de síntesis y su poder calorífico.

Un método de propiedades es una colección de métodos y modelos que el simulador usa para generar propiedades termodinámicas y de transporte tales como el coeficiente de fugacidad, entalpía, entropía, energía libre de Gibbs, volumen, viscosidad, conductividad térmica, coeficiente de difusividad, tensión superficial. Para la elección de un método y de los módulos de cálculo apropiados es necesario considerar el tipo de sustancias que intervienen y su comportamiento, características del proceso, propiedades, equipos, etcétera.

En el sistema de métodos de predicción de propiedades de Aspen no existe un modelo específico para residuos sólidos, sin embargo por su composición elemental con un alto contenido de carbono es posible usar los modelos del carbón. Los modelos de carbón son correlaciones empíricas que requieren de la información de la caracterización del material

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 71 de 100	

sólido. El simulador cuenta con dos métodos para calcular las propiedades de los sólidos no convencionales. El método HCOALGEN calcula la entalpía y el método DCOALIGT, la densidad y entalpía para sólidos no convencionales. (AspenTech 2001)

El método HCOALGEN utiliza correlaciones para el calor de combustión, el calor de formación y la capacidad calorífica. El calor de combustión de este método es un valor general expresado en Btu/lb de carbón en una base seca. Este valor general se basa en las condiciones estándar ASTM D-2015. La presión inicial del oxígeno es de 20 a 40 atmósferas y los productos están en forma de cenizas, agua, CO₂, SO₂ y NO₂. El cálculo del poder calorífico neto se realiza tomando en cuenta el calor latente de vaporización del agua. El cálculo del poder de combustión se realiza a través de correlaciones compuestas por al menos 30 parámetros ajustados por el Instituto de Tecnología del Gas usando 121 muestras de carbón de la base de datos del Estado de Pensilvania y 457 muestras de un reporte acerca del carbón de Estados Unidos (AspenTech 2001).

La ecuación DCOALIGT de densidad fue desarrollada por el Instituto de Tecnología del Gas y es funcional para un amplio intervalo de contenido de hidrógeno. La desviación estándar de esta correlación para un conjunto de datos de 190 puntos reportados en la literatura fue de $12 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ (AspenTech 2001).

Con este par de métodos se estiman solamente el valor de entalpía y densidad de los sólidos no convencionales, es decir, los residuos sólidos urbanos. Los módulos de cálculo requieren la composición de los sólidos en porcentaje en base al análisis último, análisis próximo del combustible y el contenido de agua. Las interacciones de estos componentes pueden ser descritas con el método de predicción de propiedades Peng-Robinson/Boston-Mathias (PR-BM), el cual es una ecuación de estado cúbica recomendada en la literatura acerca de simulación de gasificación de carbón y biomasa. El manual de métodos de predicción de propiedades del simulador recomienda el método PR-BM para describir mezclas no polares o medianamente polares, tales como hidrocarburos y gases ligeros como el monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, ácido sulfhídrico. Se obtienen resultados razonables a cualquier presión y temperatura (AspenTech 2001).

Entre los módulos de cálculo usados en la simulación se encuentra el RYIELD que simula un reactor en el cual se le especifica el rendimiento de los productos. De igual forma se utilizó el reactor RGIBBS que modela el equilibrio químico de los componentes y sus posibles productos a una presión y temperatura dada. En este módulo, los calores de reacción se determinan a partir de los calores de formación. Se usaron módulos separadores y mezcladores de flujo que requieren únicamente la especificación de las relaciones de flujo. También se usó el módulo HEATER el cual es adecuado para diseñar el cálculo de la adición o liberación de cierta cantidad de carga térmica especificada por el usuario (AspenTech 2001).

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 73 de 100	

La conversión del combustible a gas de síntesis está representada por los reactores llamados GASIF y GASIF2 que son módulos de cálculo de reactores RGIBBS descritos anteriormente con una variedad de productos típicos que componen el gas de síntesis que incluye hidrógeno, oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, amoniaco, ácido sulfhídrico, ácido clorhídrico y dióxido de azufre principalmente. El gasificador de lecho fluidizado tiene una recirculación de cenizas por medio de un ciclón, la cual se definió del 15%. Se considera como ceniza que no reacciona la cual fue definida en una fracción del 21% (suma de contenido de cenizas y carbono fijo).

El análisis de sensibilidad se refiere a alterar una sola variable del proceso y monitorear el comportamiento de las demás. Las variables del análisis de sensibilidad fueron la cantidad de vapor y oxígeno suministrados a la reacción para validar las condiciones de operación obteniendo un contenido de hidrógeno típico de gasificación de RSU a una temperatura de 850°C de 45.65% mol base seca (Maoyun 2009) y una eficiencia típica del proceso de gasificación de RSU de 70% a 90% (Yassin 2009).

La presión se definió por medio de la literatura en donde se encontró que este tipo de gasificadores trabaja comúnmente a presión atmosférica. Sin embargo, en un análisis rápido de sensibilidad se encontró que cuando la presión aumenta, el contenido de hidrógeno en el gas de síntesis disminuye y las variables referentes a poder calorífico y contenido de metano del gas aumentan.

En la figura 24 se observa el análisis de la temperatura para observar el comportamiento del contenido de hidrógeno y la eficiencia, la cual es definida en la literatura como la relación entre la cantidad de energía contenida en el combustible y la cantidad de energía en el gas de síntesis.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 74 de 100	

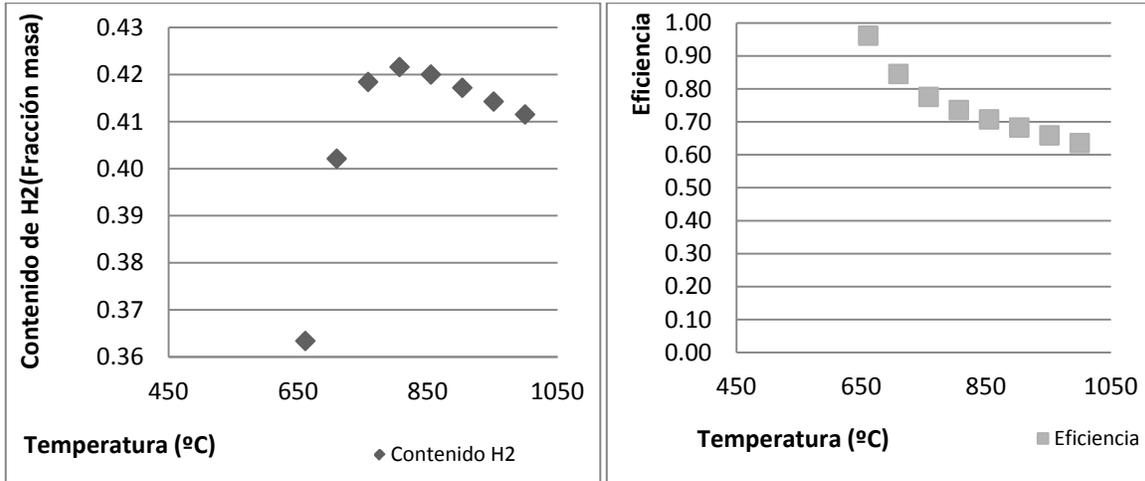


Figura 24. Gráficas de análisis de sensibilidad de temperatura de operación del reactor gasificador de RSU

En este análisis se observa que a medida que la temperatura aumenta, la eficiencia disminuye debido a que el poder calorífico y el contenido de metano disminuyen. El contenido de hidrógeno aumenta con un incremento en la temperatura, sin embargo se puede observar que a partir de temperaturas elevadas, se mantiene estable. Este comportamiento se ha observado en otros estudios de simulación en Aspen Plus® de la gasificación de residuos biomásicos (Mehrdokht 2008) y de residuos sólidos urbanos (Chen 2011). El comportamiento de gasificación reportado para carbón muestra un comportamiento en el que se incrementa el contenido de hidrógeno a medida que aumenta la temperatura y a muy altas temperaturas se estabiliza (Higman 2003). En la siguiente figura se encuentra el análisis de sensibilidad de las variables con respecto a la relación de flujos del oxígeno y la alimentación de residuos.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 75 de 100

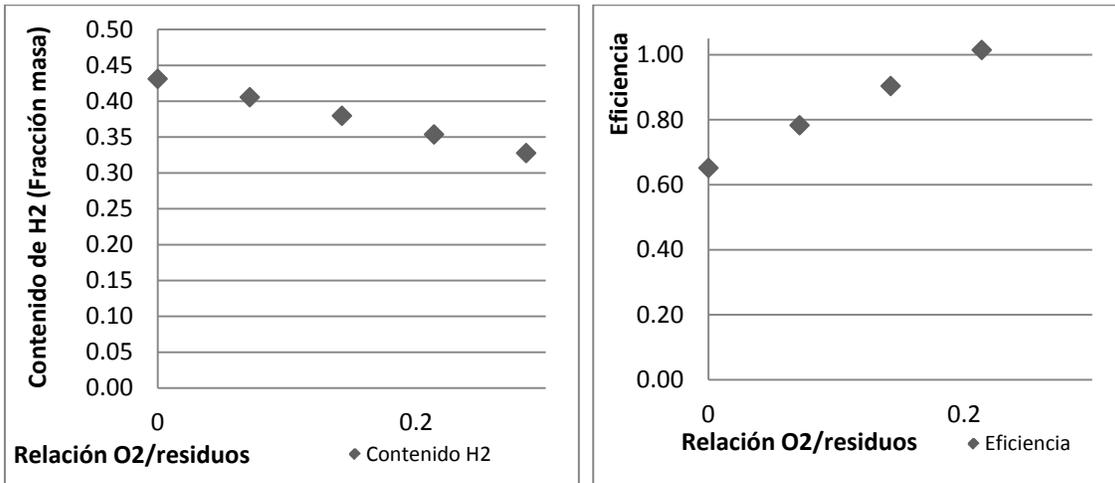


Figura 25. Gráficas de análisis de sensibilidad de la relación de flujos oxígeno-alimentación de operación del reactor gasificador de RSU

El intervalo de prueba de esta relación fue de 0 a 0.3, a medida que este valor aumenta, también aumenta la eficiencia, ya que también aumenta el poder calorífico del gas. Sin embargo, el contenido de hidrógeno disminuye, este comportamiento se ha observado en otros estudios de modelación de gasificación de biomasa (Doherty 2009) y de residuos sólidos urbanos (Chen 2011).

La relación seleccionada cuenta con los valores máximos de contenido de hidrógeno con una eficiencia dentro del intervalo típico. En las siguientes figuras se observa el análisis de sensibilidad con la variación de la relación de flujos vapor-alimentación.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 76 de 100	

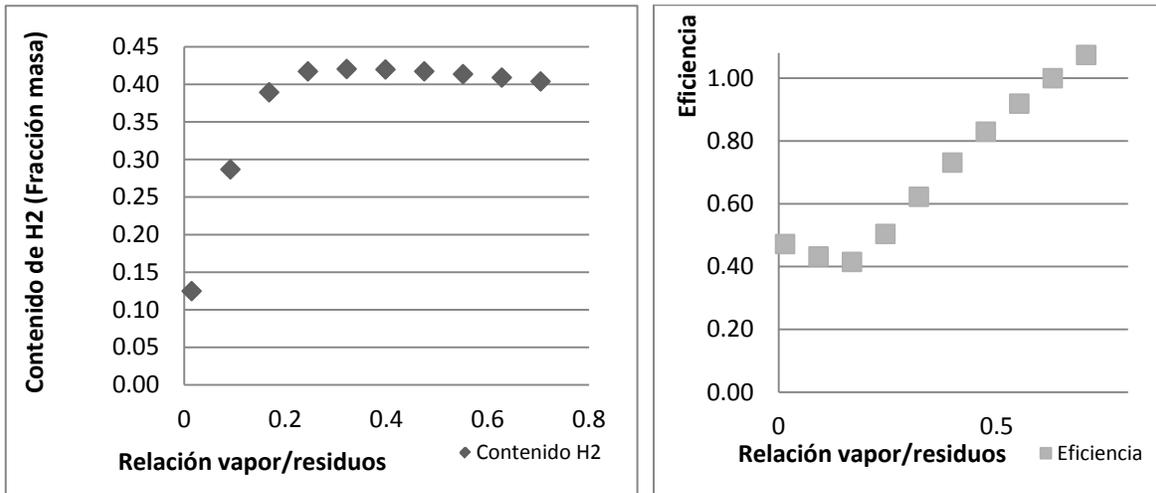


Figura 26. Gráficas de análisis de sensibilidad de la relación de flujos vapor-alimentación de operación del reactor gasificador de RSU

En las gráficas se puede observar que existe un mínimo de eficiencia a cierta relación de flujos vapor-residuos entre 0 y 0.2. Después de este valor mínimo, a medida que el flujo aumenta, la eficiencia aumenta, así como el poder calorífico. Existe un punto máximo en el que el contenido de hidrógeno es máximo entre 0.2 y 0.4, este mismo comportamiento se ha observado experimentalmente (Yanwen 2009). La relación seleccionada tiene un valor de 0.38.

Es importante aclarar que en el balance se consideran las limitaciones de la simulación por medio de Aspen Plus® ya que es un modelo de caja negra cuyos resultados son válidos únicamente para la estimación de la cantidad y composición del gas de síntesis, así como a la descripción del funcionamiento general del reactor (Gómez-Barea 2010).

Los valores de composición del gas de síntesis obtenidos en este trabajo se encuentran dentro del intervalo típico de composición cuando la gasificación se realiza con carbón (Mondal 2011). Las principales características del gasificador se pueden observar en la siguiente tabla.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 77 de 100

Tabla 20. Principales características del reactor gasificador de lecho fluidizado circulante

Operación	No. De Equipos	Características
Gasificador de lecho fluidizado circulante	1	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad: 340 toneladas/día por gasificador. • Consumo energético: 4,143 HP. • Temperatura: 850°C. • Presión: 1 atm. • Agente gasificador: Mezcla Aire/Vapor. • Relación carbono/oxígeno: 30. • Reacciones principales de pirolisis, reducción y combustión. • Eficiencia del proceso: 70%.

7.2.2.1 Balance de materia y energía del Gasificador del Caso de Estudio

El balance de materia y energía del gasificador se observa a continuación. Los resultados obtenidos con el simulador son el flujo y composición del gas.

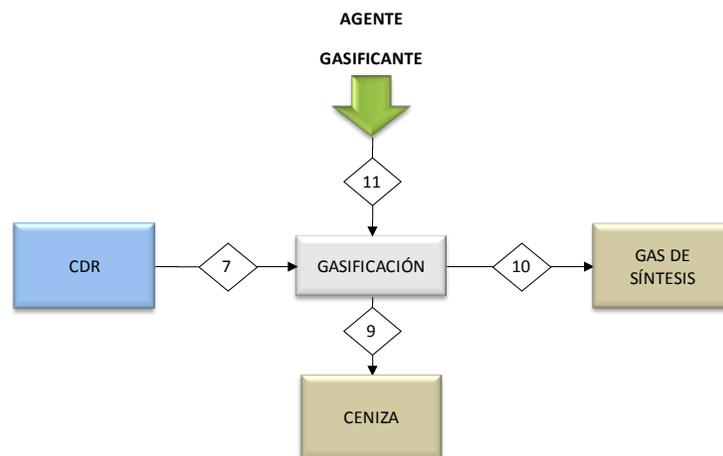


Figura 27. Diagrama de bloques del balance de materia y energía del reactor gasificador de RSU del caso de estudio

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 78 de 100	

Tabla 21. Balance de materia y energía de reactor gasificador de RSU del caso de estudio.

Nombre	Unidades	7	9	10	11
Flujo	ton/d	340.00	5.97	514.03	180.00
Presión	kg/cm ²	1.03	1.03	1.03	4.78
Temperatura	°C	100.00	850.00	850.00	141.96
Humedad	%	19.82	0.00	7.45	72.22
Poder calorífico superior (PCS)	MJ/kg	21.02	13.24	15.65	9.54
Poder calorífico inferior (PCI)	MJ/kg	19.14	-	-	-
Carbono	ton/d	137.14	-	-	-
Hidrógeno	ton/d	18.95	-	27.28	-
Oxígeno	ton/d	81.79	-	0.00	10.50
Nitrógeno	ton/d	3.64	-	0.00	39.50
Azufre	ton/d	0.58	-	0.00	-
Cenizas	ton/d	30.13	5.97	5.27	-
Agua	ton/d	67.39	-	38.31	130.00
Cloro	ton/d	0.38	-	0.00	-
Metano	ton/d	-	-	0.41	-
Monóxido de carbono	ton/d	-	-	317.40	-
Dióxido de Carbono	ton/d	-	-	71.91	-
Amoniaco	ton/d	-	-	52.45	-
Sulfuro de hidrógeno	ton/d	-	-	0.61	-
Dioxinas	ton/d	-	0.00	0.00	-
Furanos	ton/d	-	0.00	0.00	-
Ácido Clorhídrico	ton/d	-	0.00	0.38	-
Dióxido de azufre	ton/d	-	-	0.00	-
Plomo	ton/d	0.05	0.01	0.08	-
Cobre	ton/d	0.14	0.03	0.11	-
Zinc	ton/d	0.03	0.01	0.02	-
Manganeso	ton/d	0.01	0.00	0.00	-
Mercurio	ton/d	0.00	0.00	0.00	-
Arsénico	ton/d	0.00	0.00	0.00	-
Cromo	ton/d	0.03	0.01	0.02	-

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis	Página 79 de 100	

7.2.3 Limpieza del Gas de Síntesis del Caso de Estudio

El objetivo de esta etapa del proceso es la limpieza de gas de síntesis para evitar daños en el sistema de generación de energía eléctrica y la emisión de contaminantes. El gas de síntesis debe ser enfriado a menos de 200°C (Olofsson 2005). El sistema de limpieza de gases se definió con base en las especificaciones de proveedores de tecnologías de generación de energía eléctrica, las condiciones de operación del gas de síntesis y la complejidad del proceso. Se incluyó únicamente la remoción de contaminantes indicados en hojas de especificación de tecnología de generación de energía eléctrica y en las Normas Oficiales Mexicanas de emisiones de fuentes fijas y de procesos térmicos de tratamiento de residuos (Jenbacher Documentation 2009).

El producto de este sistema es un gas de síntesis libre de contaminantes o que causen daño a las instalaciones de generación de energía. Los residuos de este proceso son cenizas y agua del proceso que incluye agua con sólidos y gases disueltos (Ratafia-Brown 2002).

Entre los métodos para remover las cenizas volantes se encuentran los métodos secos como ciclones o filtros de barrera. Cualquier tipo de turbinas tienen poca tolerancia a compuestos con azufre debido a la corrosión, por lo que es el contaminante cuya remoción es la más deseable con un límite máximo de valor de contenido en el gas de síntesis limpio de 15 ppm (peso) (Mondal 2011). Las especies con nitrógeno se deben remover para evitar la emisión de óxidos, el contacto con agua remueve efectivamente estas especies como el NH₃ o especies iónicas (Ratafia-Brown 2002). Los metales pesados viajan a la corriente gaseosa por medio de las cenizas volantes, los aparatos de remoción de partículas también son útiles para retirar estos compuestos de la corriente. Sin embargo, para este tipo de sistemas se debe incluir una remoción de mercurio debido a su bajo punto de fusión (357°C) y arsénico por medio de una adsorción en carbón activado (Phillips 2010).

En la siguiente sección se presenta el balance de materia que se basa exclusivamente en eficiencias típicas reportadas para cada proceso en la literatura.

7.2.3.1 Operaciones Unitarias de la Limpieza del Gas de Síntesis del Caso de Estudio

En la siguiente tabla se observan las principales características de la limpieza del gas de síntesis.

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO Facultad de Química
--	---

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	01-02-2011
	Tesis		Página 80 de 100

Tabla 22. Principales características de los equipos de limpieza de gas de síntesis.

Nombre de Operación	No. De Equipos	Características
Intercambiador Quench	1	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de salida del gas de síntesis: 600°C
Recuperador de calor	1	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de salida del gas de síntesis: 100°C • Usa agua desmineralizada a 25°C
Filtros bolsa standard con mecanismos de limpieza	1	<ul style="list-style-type: none"> • Remoción de cenizas volantes. • Máxima temperatura de operación: 290°C. • Material de fabricación: fibra de vidrio, Teflón o Nomex. • Eficiencia de remoción: 99% (Cheremisinoff 2005). • Flujo de salida de cenizas: 5.22 toneladas/día.
Absorbedores de gases ácidos HCl y H ₂ S	2	<ul style="list-style-type: none"> • Remoción de ácido clorhídrico en absorberdor empacado por medio del uso de una solución de NaOH al 40%. • Consumo de solución: 1.07 toneladas/día de solución. • Eficiencia de remoción: 99% (Higman 2003). • Desulfurización: eficiencia de remoción de 99% (Cheremisinoff 2005). • Remoción por medio de proceso de absorción química con aminas metildietanolamina (MDEA) con proceso de regeneración del absorbente. • Eficiencia de remoción: 99% (Mondal 2011) • Se puede incluir recuperación de azufre.
Adsorbedor de mercurio		<p>Remoción de metales pesados con adsorción en carbón activado</p> <ul style="list-style-type: none"> • Remoción del 90-95% (Ratafia-Brown 2002).

A continuación se observa el diagrama de flujo del gasificador y la limpieza del gas de síntesis, así como la lista de equipos.

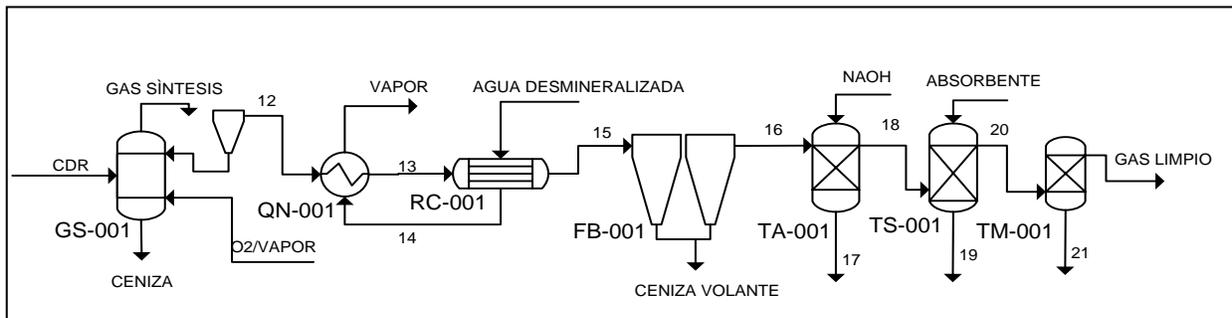


Figura 28. Diagrama del sistema de gasificación y limpieza de gas de síntesis

Tabla 23. Lista de equipos de sistema de gasificación y limpieza de gas de síntesis.

Etiqueta mostrada	Descripción
FB-001	Filtro de bolsa
GS-001	Gasificador de lecho fluidizado circulante
QN-001	Quench
RC-001	Recuperador de calor
TA-001	Absorbedora de HCl
TS-001	Absorbedora de H ₂ S
TM-001	Adsorbedor de metales

7.2.3.2 Balance de materia y energía del tratamiento de limpieza de gas de síntesis del Caso de Estudio

El balance de materia y energía del gasificador se observan a continuación en la siguiente figura y en la siguiente tabla.

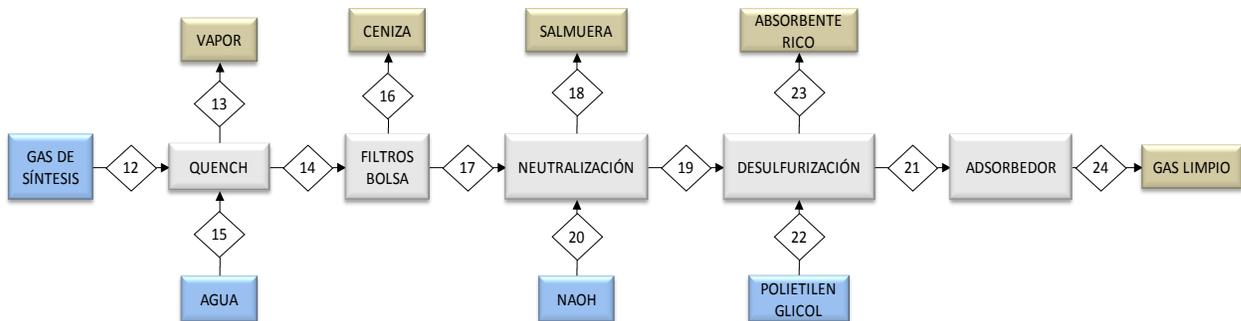


Figura 29. Diagrama de bloques de balance de materia y energía de la limpieza de gas de síntesis

Tabla 24. Balances de materia y energía del sistema de limpieza de gas de síntesis

Nombre	Unidades	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Flujo	ton/d	514.03	400.00	514.03	400.00	5.22	508.81	1.45	508.43	1.07	507.78	2.42	3.03	507.78
Presión	kg/cm ²	1.03	46.74	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
Temperatura	°C	850.00	257.82	100.00	25.00	100.00	100.00	25.00	100.00	25.00	100.00	35.00	35.00	100.00
Humedad	%	7.45	0.00	7.45	100.00	-	7.53	42.65	7.53	60.00	7.54			7.54
PCS	MJ/kg	15.65	13.93	15.65	-	-	15.65	-	15.65	-	15.65	-	-	15.65
Hidrógeno	ton/d	27.28	-	27.28	-	0.00	27.28	-	27.28	-	27.28	-	-	27.28
Oxígeno	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Nitrógeno	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Azufre	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Cenizas	ton/d	5.27	-	5.27	-	5.22	0.05	-	0.05	-	0.05	-	-	0.05



PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Fecha

31-05-2011

Tesis

Página 83 de 100

Nombre	Unidades	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Agua	ton/d	38.31	400.00	38.31	400.00	0.00	38.31	0.83	38.31	0.64	38.31	-	-	38.31
Cloro	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Metano	ton/d	0.41	-	0.41	-	0.00	0.41	-	0.41	-	0.41	-	-	0.41
Monóxido de carbono	ton/d	317.40	-	317.40	-	0.00	317.40	-	317.40	-	317.40	-	-	317.40
Dióxido de Carbono	ton/d	71.91	-	71.91	-	0.00	71.91	-	71.91	-	71.91	-	-	71.91
Amoniaco	ton/d	52.45	-	52.45	-	0.00	52.45	-	52.45	-	52.45	-	-	52.45
Sulfuro de hidrógeno	ton/d	0.61	-	0.61	-	0.00	0.61	-	0.61	-	0.01	-	0.61	0.01
Dioxinas	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Furanos	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Ácido Clorhídrico	ton/d	0.38	-	0.38	-	0.00	0.38	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Dióxido de azufre	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Plomo	ton/d	0.08	-	0.08	-	0.08	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Cobre	ton/d	0.11	-	0.11	-	0.11	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Zinc	ton/d	0.02	-	0.02	-	0.02	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Manganeso	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Mercurio	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Arsénico	ton/d	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Cromo	ton/d	0.02	-	0.02	-	0.02	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
Hidróxido de sodio	ton/d	-	-	-	-	-	-	-	-	0.43	-	-	-	-
Cloruro de sodio	ton/d	-	-	-	-	-	-	0.62	-	-	-	-	-	-
Mezcla de absorbentes	ton/d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.42	2.42	-

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 84 de 100	

7.3 Generación de energía eléctrica

El poder calorífico del gas de síntesis se puede usar para producir calor o generar energía eléctrica. En este caso se estudió la generación de energía eléctrica debido a que el uso del calor es más común en países con climas fríos. La generación de energía se puede llevar a cabo a través de varios procesos tales como ciclos combinados, turbinas de gas, turbinas de vapor, celdas de combustible, entre otros. Se introdujeron los datos en el software generado a partir del Software Ret Screen® en la que se listan y se comparan los equipos disponibles de generación para motores de gas, turbinas de gas y ciclos combinados (Espinoza 2010). Ret Screen® es un software especializado que tiene el fin de evaluar proyectos de generación de energía, costos, ahorros, emisiones, viabilidad financiera y riesgo para tecnologías de energías renovables y tecnologías energéticamente eficientes. Este software es realizado por el Ministerio de Recursos Naturales de Canadá (Natural Resources Canada 2010).

Existen varios equipos disponibles en el mercado de motores de gas, turbinas de gas y ciclos combinados que pueden usar el combustible con las características de composición y cantidad del gas de síntesis obtenido en la etapa de gasificación. Los motores eléctricos requieren de un número grande de unidades entre 10 y 279. El proceso más eficiente es el ciclo combinado, con el que se podría instalar una capacidad máxima de 32.88 MW, el cual consta de una turbina de gas del modelo Alstom GT10C de 29.06 MW y una turbina de vapor de 3.288 MW. Este ciclo combinado tiene una eficiencia del 36 % y tiene un consumo típico de energía del 2.8 %. El consumo energético del tratamiento previo es de 8.13 MW y de gasificación es de 3.09 MW. En total queda una generación neta de 20.73 MW o de 530 kWh/tonelada.

Otro aspecto importante a revisar es lo relativo a las emisiones de gases de efecto invernadero, el proceso propuesto de generación de energía eléctrica con las características del gas combustible da un factor de emisión de 0.6 kg de CO₂/kWh que es menor que el valor típico de 0.83 kg de CO₂/kWh para gasificación de carbón o de 0.9 kg de CO₂/kWh kg para combustión de carbón (Ratafia-Brown 2002).

Es importante mencionar que este sistema de generación eléctrica de ciclo combinado se encuentra bien establecido y confiable para el combustible de gas natural que tiene un poder calorífico de 36 a 42 MJ/kg (Drake 2011). Para la aplicación de ciclo combinado a gas de síntesis producto de gasificación de RSU se requiere un análisis de factibilidad económica del proyecto ya que se ha reportado en centrales de gasificación de carbón que la proporción de inversión más alta es del sistema de gasificación (Treviño 2011). En comparación con otras tecnologías de generación de energía eléctrica los ciclos combinados tienen un costo nivelado bajo con una fuerte sensibilidad en el precio de combustible (Drake 2011). En cuanto a limpieza, la

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
Tesis		Página 85 de 100	

posibilidad de limpieza del gas de síntesis antes de la emisión del gas de combustión mejora el control de las emisiones en comparación con el control requerido cuando el gas es de combustión.

La producción de energía eléctrica en México se centra en plantas termoeléctricas e hidroeléctricas en mayor proporción (SENER 2008). La diversificación de las fuentes de energía significa mayor seguridad energética en el país que evita una dependencia mayor a los mercados de combustibles tradicionales como el petróleo o el gas natural

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 86 de 100	

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La gasificación de material con alto contenido de carbón es una tecnología que se ha aplicado para la producción de energía eléctrica alrededor del mundo. Sin embargo, los reportes de esta tecnología se han encontrado equipos de gasificación de hasta 500 toneladas/día (Higman 2003). El potencial para aplicar esta tecnología debe ser estudiada a profundidad ya que la aplicación de diversas alternativas de tratamiento y valorización de residuos es la clave para su manejo integral. La gasificación de residuos representa una opción para tratar una fracción de RSU del caso de estudio que se constituye por un flujo muy grande de material combustible con bajo potencial de reciclado o reuso por razones de infraestructura o mercado como por ejemplo plásticos, madera, papel, cartón, material orgánico seco entre otros. Es importante mencionar que para aplicar la gasificación de residuos se requiere un tratamiento previo para acondicionar la alimentación para el funcionamiento del reactor.

Para el caso de estudio se establecieron los criterios de diseño de un proceso de gasificación considerando un flujo de entrada de 550 toneladas diarias de RSU sin separación en el origen con una composición de material orgánico del 50%, porcentaje de humedad del 30% y el resto de material inorgánico y una capacidad calorífica de al menos 10 MJ/kg . Se incluye un proceso de producción de CDR con remoción de material de reciclaje, trituración y secado. Posteriormente se consideró una entrada de 340 toneladas diarias al sistema de gasificación. El sistema de gasificación propuesto es de lecho fluidizado circulante y sus características se modelaron por medio del uso del Software Aspen Plus®.

Por medio del análisis realizado en este trabajo se obtuvo que a partir de una cantidad de 340 toneladas al día de CDR se puede llevar a cabo un proceso de gasificación con eficiencia térmica del 70%, con el potencial de generar 20.73 MW netos a través de un ciclo combinado.

La simulación del caso de estudio permite realizar análisis de sensibilidad en las variables del gasificador, se concluye que a mayor presión, el gas de síntesis aumenta su poder calorífico debido a que se genera una mayor cantidad de metano. A medida que la temperatura aumenta se disminuye el poder calorífico del gas. La producción de H₂ es alta a temperaturas altas. Con esta herramienta se pueden modelar otros tipos de gasificadores convencionales.

En ocasiones, las tendencias obtenidas en simuladores de procesos tienen posibilidad de no ser representativas, por eso se considera que para modelos de gasificación de material con alto contenido de carbón, como el que se usó en este trabajo de investigación el uso del simulador de procesos es útil únicamente para estimar la cantidad y composición del gas de síntesis como modelo de caja negra. Para un análisis más detallado se requieren algoritmos complejos que tomen en cuenta en sus

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
Tesis		Página 87 de 100	

cálculos una mayor cantidad de fenómenos fisicoquímicos de transferencia de masa y energía tales como velocidad del gas o velocidad de circulación de los sólidos.

El sistema de generación de energía eléctrica elegido es eficiente técnicamente y para definir el equipo se utilizó una base de datos del Software de evaluación de proyectos energéticos RetScreen[®].

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 88 de 100	

9. BIBLIOGRAFÍA

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

Ahmed, I. «Characteristics of cardboard and paper gasification with CO₂.» *Applied energy*, nº 86 (2009): 2626-2634.

Arjan, Kirkels. «Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 15 (2011): 471-481.

Belgiorno, V. «Energy from gasification of solid wastes.» *Waste Management* (Pergamon), nº 23 (2003): 1-15.

Bridgwater, A.V. «A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion.» *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, nº 6 (2002): 181-248.

Caputo, Antonio. «RDF production plants: Design and costs.» *Applied Thermal Engineering*, 2002: 423-437.

Chen, C., Jin, Y.-q., Yan, J.-h., y Chi, Y. «Simulation of municipal solid waste gasification for syngas production in fixed bed reactors.» *Fuel* (2011): 10.1016/j.fuel.2011.06.075.

De-Zhi S, S. «Effect of MSW source-classified collection on the emission of PCDDs/Fs and heavy metals from incineration in China.» *Journal of Hazardous Materials*, 2008:685-694.

Diaz-Somoano, M. «Trace Element Removal From Hot Gasification Flue Gases Using Solid Sorbents.» *Global NEST Journal* 8, nº 2 (2006): 137-145.

Doherty, Wayne. «The effect of air preheating in a biomass CFB gasifier using ASPEN Plus simulation.» *Biomass & Energy*, 2009: 1158-1167.

Giugliano, M. «Energy recovery from municipal waste: A case study for a middle-sized Italian district.» *Waste Management*, nº 18 (2008): 39-50.

Gómez-Barea, Alberto. «Modeling of biomass gasification in fluidized bed.» *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010: 444-509.

Hiroki, Yoshida. «Two-stage equilibrium model for a coal gasifier to predict the accurate carbon conversion in hydrogen production.» *Fuel*, nº 87 (2008): 2186-2193.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 89 de 100	

Hsien, Khoo. «Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies.» *Waste Management*, nº 29 (2009): 1892-1900.

Koukouzas, N. «Co-gasificación de solid waste and lignite - A case study for Western Macedonia.» *Waste Management*, 2008: 1263-1275.

Lemmens, Bert. «Assessment of plasma gasification of high caloric waste streams.» *Waste Management*, nº 27 (2006): 1562-1569.

Linghong, Zhang. «Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass.» *Energy Conversion and Management*, nº 51 (2010): 969-982.

Malkow, Thomas. «Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal.» *Waste Management* (Elsevier), nº 24 (febrero 2003): 53-79.

Maoyun, He. «Hydrogen-rich from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of catalyst and temperature on yield and product composition.» *International Journal of Hydrogen Energy*, nº 34 (2009): 195-203.

Mehrdokht, Nikko. «Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using ASPEN PLUS.» *Biomass and Energy*, nº 32 (2008): 1245-1254.

Minutillo, M. «Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combined cycle power plant.» *Energy Conversion and Management*, nº 50 (2009): 2837-2842.

Mondal, P. «Syngas production through gasification and cleanup for downstream applications — Recent developments.» *Fuel Processing Technology*, nº 92 (2011): 1395-1410.

Nirmal, Gnanapragasam. «Feasibility of an energy conversion system in Canada involving large-scale integrated hydrogen production using solid fuels.» *International Journal of Hydrogen Energy*, nº XXX (2009): 1-20.

Olofsson, Ingemar. *Initial Review and Evaluation of Process Technologies and Systems Suitable for Cost-Efficient Medium-Scale Gasification for Biomass to Liquid Fuels*. Technical paper, Department of Engineering, Physics and Mathematics,, University of Umeå, Umeå, Sweden: 1Energy Technology & Thermal Process Chemistry, 2005.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 90 de 100	

Puig-Arnavat, María. «Review and analysis of biomass gasification models.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 14 (2010): 2841-2851.

Yanwen, Guan. «Steam catalytic gasification of municipal solid waste for producing tar-free fuel gas.» *International Journal of hydrogen energy*, nº 34 (2009): 9341-9346.

Yassin, Liban. «Techno-economic performance of energy-from-waste fluidized bed combustion and gasification processes in the UK context.» *Chemical Engineering Journal*, 2009: 315-327.

DOCUMENTOS OFICIALES

European Commision - Directorate General Environment. *Refuse derived fuel,current practices and perspectives*. Reporte final, Referencia: CO5087-4, 2003.

Gobierno del Distrito Federal. «Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos para el Distrito Federal.» nº 720. Distrito Federal: Gaceta Oficial del Distrito Federal, 13 de Septiembre de 2010.

SMA. «Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal.» Documento Oficial, Distrito Federal, 2007, 11.

SENER. «Estudio sobre Tarifas y Costos de Suministro.» 2008.

INFORMES

BifA GbH. «Energetische Nutzung der Biomassenanteile in Abfällen, Anhang.» Anexo de un Informe Técnico, 1995.

EBARA. «TwinRec Reference List.» Documento técnico, Inglaterra, 2007.

EBARA. «Waste Gasification in Practice: TwinRec Fluidized bed Gasification and Ash Melting - Review of Four Years of Commercial Plant Operation.» Phoenix, Arizona, 2004.

Jenbacher Documentation. *Fuel Gas quality Special Gases*. Technical Documentation, 2009.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 91 de 100	

Juniper. «Pyrolysis and gasification of waste a worldwide technology and Business Review.» Inglaterra, 2001.

Nippon Steel. «Development of high performance direct melting process for municipal Solid Waste.» Nippon Steel Technical Report No. 92, 2005.

Plasco Energy Group. «Plasco Energy Recovery Demonstration Project.» Ottawa, 2005.

Quapp, William. «General Description of the Plasma Enhanced Melter.» Richland WA., 2002.

Ratafia-Brown, Jay A. «AN ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF IGCC POWER SYSTEMS.» *Nineteenth Annual Pittsburgh Coal Conference, September 23 – 27. 2002.*

Selinger, Adrian. «Waste gasification in Practice: TwinRec Fluidized Bed Gasification and Ash Melting Review of Four Years of Commercial Operation.» Phoenix, Arizona, 2004.

Uhde Thyssenkrupp. «Technologien der Feststoff-Vergasung im Hause UHDE.» Gasification Portfolio, 2007.

Treviño, Manuel. «Tecnología de gasificación integrado en ciclo combinado. Aplicación Real en España.» ElCoGas S. A., 2011.

LIBROS

Anderson. *Estadística*. Ciudad de México: Cengage Learning, 2008.

Cheremisinoff, Nicholas. *Gasification Technologies: a primer for engineers and scientists*. Boca Ratón FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

Higman, Christopher. *Gasification*. Burlington MA: Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2003.

Pichtel, John. *Waste Management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial*. Taylor & Francis, 2005.

Sunggyu Lee, James G. Speight and Sudarshan K.Loyalka,. *Hand Book Alternative fuel technologies*. Boca Ratón, FL.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 92 de 100	

Tchobanoglous, George. *Gestion Integral de los Residuos Sólidos*. Madrid, España: Mc Graw Hill, 1994.

—. *Handbook of Solid Waste Management*. EUA: McGraw-Hill, 2002.

Tchobanoglous, George, Hilary Theisen, y Samuel A. Vigil. *Gestion Integral de los Residuos Sólidos*. Madrid, España: Mc Graw Hill, 1994.

UNEP. *Developing Integrated Solid Waste Management*. Vol. 1. 4 vols. Osaka, 2009.

—. *Solid Waste Management*. Vol. II: Regional Overviews and Information Sources. Osaka, 2005.

World bank. *Energy from Biomass: A review of combustion and gasification technologies*. Washington DC: World Bank technical paper, 1999.

MANUALES

AspenTech. «Aspen Physical Property System.» *Manual del Usuario*. Cambridge MA, 2001.

—. «Aspen Plus User Guide.» Cambridge MA: Manual del Usuario, 2001.

PÁGINAS ELECTRÓNICAS

Bio-Sistemas Sustentables sapi de CV. *Comunicación Social*. 2010 de Septiembre de 8. http://www.biosistemas.com.mx/index_archivos/ComunicacionSocial.htm (último acceso: 02 de Marzo de 2011).

Clean-energy us. *Wabash River*. 2009. <http://www.clean-energy.us/success/wabash.htm> (último acceso: 27 de noviembre de 2009).

Dove Equipment & Machinery Co. Ltd. *Trommels, revolving screens*. 2008. http://www.dovemining.com/trommel_classifier.htm (último acceso: 26 de noviembre de 2010).

Drake, E. *Lecture notes (Sustainable Energy Course at Massachusetts Institute of Technology)*. <http://ocw.mit.edu/courses/chemical-engineering/10-391j-sustainable-energy-spring-2005/lecture-notes/>. (último acceso: 2 de noviembre de 2011)

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 93 de 100	

EBARA. «ICFG – Fluidized Bed Gasification.» 2007. http://www.ebara.ch/_en_/icfg.php?n=1 (último acceso: 02 de Diciembre de 2009).

ENERGOS. «Energy from waste.» *Commercially proven energy recovery*. Junio de 2010. http://www.energ.co.uk/resources/files/244_EFW%20Brochure%20June%202010.pdf (último acceso: 09 de Octubre de 2010).

EPA . *Basic Information Wastes*. 2009. <http://www.epa.gov/osw/basic-solid.htm> (último acceso: 28 de mayo de 2009).

Foster Wheeler. «Boiler Design For Lagisza Power Plant.» 2004. http://www.fwc.com/publications/tech_papers/files/TP_CFB_04_02.pdf?DIRNAME=%23dirname%23 (último acceso: 27 de 07 de 2010).

—. «The Foster Wheeler gasification technology for biofuels: refuse-derived-fuel (RDF) power generation.» 2007. http://www.fwc.com/publications/tech_papers/files/TP_PC_05_05.pdf?DIRNAME=%23dirname%23 (último acceso: 27 de 07 de 2010).

Gasification Technologies Council. *From Waste to Energy and Valuable Products*. 2011. http://www.gasification.org/page_1.asp?a=82&b=79 (último acceso: 03 de Marzo de 2011).

INEGI. «Generación de residuos sólidos urbanos por entidad federativa, 1998 a 2008.» 2008. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mamb58&s=est&c=6120> (último acceso: 22 de julio de 2009).

—. Generación de residuos sólidos urbanos por entidad federativa, 2000 a 2009. 2011. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb58&s=est&c=21646> (último acceso: 21 de Julio de 2011).

—. Información Nacional por Entidad Federativa y Municipios. 2010. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=09> (último acceso: 2011 de Julio de 21).

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 94 de 100	

Jeffrey Specialty Equipment. «Typical Installations.» *AB Hammermill Brochure*. 2010. <http://www.banyanchaines.com/BrochuresPDF/AB%20Hammermill%20brochure.pdf> (último acceso: 29 de noviembre de 2010).

Natural Resources Canada. *RETScreen International*. 2010. <http://www.retscreen.net/ang/home.php> (último acceso: 15 de Septiembre de 2010).

Phillips, Jeffrey. «1.2.1 Different types of gasifiers and their integration with gas turbines.» 2010. <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/handbook/1.2.1.pdf> (último acceso: 03 de Febrero de 2011).

Shangai Machinery Co. Ltd. *Vibrating Screen*. 2010. <http://www.unisbm.com/products/vibrating-screen.html?gclid=CKnQksHOxaUCFYvt7QodSOJp0w> (último acceso: 29 de Noviembre de 2010).

Thermoselect. *Process Overview*. 2011. <http://www.thermoselect.com/index.cfm?fuseaction=Verfahrensuebersicht&m=2> (último acceso: 16 de Febrero de 2011).

Vandenbroek International. «Refuse Derived Fuel.» *Brochure*. 2010. <http://www.vadeb.com/fileadmin/vandenbroek/pdf/EN/brochure-rdf-drying-UK.pdf> (último acceso: 29 de Noviembre de 2010).

PRESENTACIONES TÉCNICAS

EPRI. *PULVERIZED COAL AND IGCC PLANT COST AND PERFORMANCE ESTIMATES*. Washington, 2004.

SIMEPRODE. «Manejo de residuos en ciudades de alta generación.» *Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C., Presentación del Congreso Enviropro*. Distrito Federal, 1 de Octubre de 2009.

Tijera, E. «Plásticos ¿Biodegradables o reciclables?.» *SIMEPRODE, Presentación del Congreso Green Expo*. Distrito Federal, 16 de Octubre de 2007.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 95 de 100	

Urbaser, S. A. «La Tecnología de la Gasificación aplicada a los Residuos Sólidos Urbanos.» Presentación del Congreso Internacional en el Tratamiento y la Gestión de Residuos Municipales, 2009.

World Bank. «Municipal Solid Waste Treatment Technologies and Carbon Finance.» *Presentación Power Point*. 2008.

TRABAJOS DE TESIS

Cabrera Delgado, Nayeli. «Opciones de Tecnologías de conversión térmica para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal.» *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química*. Ciudad de México: UNAM, 2010, Tutor: Dr. Alfonso Durán Moreno.

Espinoza, Jesús. «Criterios para la selección de tecnologías de Generación de Potencia Eléctrica a partir de la Valorización Energética de los RSU.» Distrito Federal: Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, UNAM 2010, Tutor: Dr. Alfonso Durán Moreno, 2010.

Garcés, Manuel. «CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL DISTRITO FEDERAL MEDIANTE SU MUESTREO PARA SU VALORIZACIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL.» *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química*. Distrito Federal: UNAM, 2010, Tutor: Dr. Alfonso Durán Moreno.

Klein, Alexander. «Gasification: An Alternative process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes.» *Tesis de M.S. in Earth Resources Engineering*. NY: Columbia University, 2002.

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 96 de 100	

10. ANEXOS

ANEXO A – Residuos Sólidos Urbanos por Estación de Transferencia

Tabla A.1 Composición de los RSU (% peso) por Estación de Transferencia (ET)

Material	ET1	ET2	ET3	ET4	ET5	ET6	ET7	ET8	ET9	ET10	ET11	ET12	ET13
Cartón	3.84	3.28	5.95	3.03	2.93	3	1.27	1.57	2.26	5.55	5.64	2.82	2.75
Cuero	0	0	0	0	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0
Hueso	0.34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Latas de aluminio	0.15	0.13	0.25	0.42	0.09	0.22	0.3	0.08	0.47	0	0	0	0.15
Cerámica	0.51	1.12	0	1.71	0	0.39	0.08	0.78	0	5.49	0	1.55	0.96
Madera	1.09	1.14	0.34	0.37	0.5	0.19	0.28	0.2	0.14	0.7	0.38	0	0.08
Material de Construcción	0.46	4.69	0	0	0.01	0.55	3.55	4.53	5.51	0	0	0.77	0
Material Ferroso	0	0.94	1.49	1.67	0.75	2.36	0.83	1.66	1.07	0.8	1.1	1.09	1.37
Material no ferroso	1.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pañal y toallas sanitarias	5.56	3.15	9.5	4.08	1.94	6.37	5.86	1.92	4.78	15.98	9.11	6.69	9.57
Papel aluminio	0.16	0.24	0	0	0.19	0	0	0	0	0.09	0	0.43	0
Papel impreso	1.09	3.44	2.05	1.47	4.45	1.16	0.93	0.95	1.39	1.01	0.65	1.1	2.68
Papel Revista	1.2	0.43	0.98	1.34	0.49	0.26	0.61	0.23	1.34	2.28	0	1.97	0.46
Papel encelado	0	0	0.89	1.24	0.09	0	0	1.42	1.16	1.32	0	0	0
Papel Sanitario	5.77	6.59	0.89	1.7	9.58	8.46	4.94	5.11	5.62	6.84	6.94	7.29	7.57
Otro papel	0.84	1.53	1.32	0	2.64	1.08	1.88	0	1.33	0	0	1.35	1.81



PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Fecha

31-05-2011

Tesis

Página 97 de 100

Material	ET1	ET2	ET3	ET4	ET5	ET6	ET7	ET8	ET9	ET10	ET11	ET12	ET13
Papel periódico	1.34	1.67	2.97	1.34	2.47	2.93	1.64	1.65	1.06	0.85	3.15	1.53	1.87
Plástico N-1 PET	1.11	1.6	2.15	0.89	1.51	0.75	0.63	0.2	2.38	1.7	3.22	1.47	1.06
Plástico N-2 PEAD	0.44	1.7	1.54	0.84	0.78	0.58	1.24	1.1	2.01	1.97	1.91	2.35	0.91
Plástico N-3 PVC	0.17	0.32	0.21	0.38	0.17	0.11	0	0.02	0.06	0.46	0.18	0.25	0.04
Plástico N-4	0.28	0.35	0.55	0.61	0.27	0.99	0.25	0.5	0.25	0.6	0.28	0.61	0.19
Plástico N-5	0.59	0.47	0.87	1.76	0.92	0.64	0.53	0.43	0.57	0.67	1.28	1.31	0.91
Plástico N-6	0.45	0.37	0.68	0.79	0.52	0.4	0.44	0.51	0.64	0.73	1.27	0.83	0.58
Plástico N-7	1.19	1.05	0.33	1.12	0.45	1.01	0.24	0.81	0.47	0.78	0.7	1.59	1.03
Bolsa de plástico	8.29	8.1	6.09	8.37	8.13	6.61	2.79	4.44	4.56	6.07	6.46	6.13	7.3
Residuo finos	0.29	0.07	3.22	0.38	0.17	1.01	0.2	0.86	2.72	0.85	2.93	0.57	0.97
Residuos orgánicos	41.8	45.0	41.9	48.4	46.5	45.7	62.7	63.7	50.2	35.4	39.9	46.9	41.57
Tetra pack	0.59	2.13	1.2	1.13	1.48	0.75	0.43	0.65	0.98	1.21	1.67	1.21	1.86
Textiles	9.38	0.66	5.99	3.06	3.44	5.6	0.91	2.65	2.42	3.3	2.34	3.97	6.45
Poliuretano	8.41	0.58	0.96	0.67	0.77	0.86	0.61	0.4	0.52	0.37	0.46	0	0.61
Vidrio de color	0.74	0	0.34	1.09	1.15	0	0.35	0.42	0.81	0	4.17	0.9	0.15
Vidrio transparente	1.31	4.17	0.8	0.98	2.22	2.92	0.92	1.56	2.17	2.05	1.91	2.01	2.5
Zapatos	0	0	0	0	0	0	0.72	0	1.63	0.62	0.79	2.11	0
Residuos especiales (pilas, llantas, materiales punzo y cortantes)	0.61	4.01	0.82	0.98	1.52	2.06	0.04	0.65	0.31	0.93	1.19	0.94	3.96
Residuos peligrosos	0	0.1	0.26	0.35	0.1	0.33	0.25	0.46	0	0.09	0.04	0	0
Otros	0.71	0.89	5.41	9.73	3.41	2.71	4.55	0.5	1.12	1.28	2.28	0.21	0.63

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA				Fecha	31-05-2011
	Tesis					Página 98 de 100

Material	ET1	ET2	ET3	ET4	ET5	ET6	ET7	ET8	ET9	ET10	ET11	ET12	ET13
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla A.2 Lista de Estaciones de Transferencia (ET).

ET	Etiqueta
Álvaro Obregón	ET1
Azcapotzalco	ET2
Benito Juárez	ET3
Coyoacán	ET4
Cuauhtémoc	ET5
Gustavo A. Madero	ET6
Iztapalapa I	ET7
Iztapalapa 2	ET8
Miguel Hidalgo	ET9
Milpa Alta	ET10
Tlalpan	ET11
Venustiano Carranza	ET12
Xochimilco	ET13

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 99 de 100	

ANEXO B - Costos

Para calcular los costos, el proceso se divide en 3, primero se calculará el costo del tratamiento previo, en seguida el del módulo de gasificación y limpieza de gas de síntesis y por último del ciclo combinado.

El costo unitario del tratamiento previo es de máximo 30,000 USD/tonelada/día (Tchobanoglous, Handbook of Solid Waste Management 2002). Para una planta de 550 toneladas/día se usa un factor de 1.3888 debido a la actualización de precios abril de 2011 con el Índice Engineering News Record de 9027.23. Con estos datos se obtiene un costo total de \$MUSD 22.91.

En cuanto al sistema de gasificación y limpieza de gases se toma la ecuación reportada en la literatura (Bridgwater 2002), la cual expresa el costo total de una planta con un gasificador de lecho fluidizado circulante con limpieza de gases. El costo se actualiza por medio del índice Marshall & Swift para el primer cuarto de 2011.

Donde TPC (USD) es el costo total de la planta y Q es la capacidad del gasificador. Si el sistema de gasificación opera con $Q=14.166$ ton/h, el costo total de la planta es de \$MUSD 41.86.

El costo de la turbina a gas se calcula a partir de la siguiente ecuación que es aplicable a equipos con una capacidad de 5 a 50 MW:

Donde:

CTG es el costo específico de la turbina a gas, USD/kW.

WTG es la capacidad de la turbina a gas, kW

El costo de turbina a gas se calcula con

Donde:

CTV es el costo específico de la turbina a vapor, USD/kW.

WTV es la capacidad de la turbina a vapor, kW

Por tanto el costo del ciclo combinado es de \$MUSD 49.9. Que incluye el costo de equipo y su instalación.

En total el costo de la planta es de \$MUSD 114.67 que se divide en los siguientes costos directos e indirectos (Yassin 2009).

	PROPUESTA CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	Fecha	31-05-2011
	Tesis	Página 100 de 100	

Tabla B.1. Componentes del costo total de la planta (Yassin 2009)

Componentes de Costo	Factor	\$MUSD
Costos directos		
Equipo (EC)	100%	53.088
Tubería	0.08EC	4.247
Sistemas y Servicios Auxiliares	0.12EC	6.371
Eléctrico	0.1EC	5.309
Control e Instrumentación	0.1EC	5.309
Trabajo Civil	0.2EC	10.618
Costo total directo		84.941
Costos indirectos		
Ingeniería y Supervisión	0.12EC	6.371
Costos directos e indirectos		91.311
Contingencias	0.1EC	11.679
Contratistas	0.1EC	11.679
Costo total de planta	114.67	114.67

Para realizar una evaluación económica se tomarían en cuenta como ahorros por autoabastecimiento en la tarifa 5 de alumbrado público la cual es de aproximadamente 2.161 MXN/kWh (SENER 2008). El factor de planta se considera del 90% por que en la literatura se maneja una operación de 329 días al año (Yassin 2009). El costo variable de operación y mantenimiento típico para plantas de IGCC para carbón y es de \$USD 66.00/tonelada (EPRI 2004). Otros costos de operación son la energía eléctrica, los empleados o la disposición de cenizas.