



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS
POR MEDIO DE LA TECNOLOGÍA DE
GASIFICACIÓN POR ARCO DE PLASMA
TÉRMICO A PARTIR DE RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA
P R E S E N T A :
PAULA HELENA BLANCO SÁNCHEZ





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado Asignado:

PRESIDENTE: Dr. Luis Cedeño Caero

VOCAL: Ing. Rodolfo Torres Barrera

SECRETARIO: Dr. Alfonso Durán Moreno

1er. SUPLENTE: Profa. Graciela Guadalupe del Carmen Díaz Argomedo

2do. SUPLENTE: Prof. Euberto Hugo Flores Puebla

El presente tema se desarrolló en el 4to Piso de la Torre de Ingeniería, en la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria.

Asesor del tema:

Dr. Alfonso Durán Moreno

Supervisora Técnica:

M. en I. Isela Jazmín Martínez Medina

Sustentante:

Paula Helena Blanco Sánchez

AGRADECIMIENTOS

A mis papás: no todos los hijos son afortunados de tenerlos a ustedes como padres. Gracias por enseñarme a levantar la cara ante las adversidades; por estar siempre ahí cuando más los necesité, por estar cada día pendientes de mí, gracias los admiro y los amo con toda mi alma. Lo que soy ahora se los debo a ustedes.

Gracias a la vida por permitirme conocer a un ser increíble, al cual extrañaré y amaré eternamente, mi hermano Pancho. Este trabajo es para ti, donde quiera que estés.

Al Pipe por ser mi compañero de desvelos, mi amigo, pero sobre todo mi hermano. Gracias por todas las aventuras que hemos vivido juntos. Te amo, sin lugar a dudas eres una gran inspiración y ejemplo a seguir.

A Quique, la persona más increíble que jamás pensé tener a mi lado. Mi compañero inseparable, el amor de mi vida, gracias por acompañarme en este camino, por compartir tantos momentos, por enseñarme tantas cosas. Gracias por permitirme crecer contigo. Te admiro demasiado y espero poder compartir el resto de mi vida a tu lado, te amo.

A los amigos que la vida me ha dado: Betingas, Chucho, Tania, Clau, Manolo, Puppy, Jinxy, Ñu, Tere y Elason gracias por darme su amistad incondicional. A todos mis prim@s, ti@s y a mis abuelitos que siempre han estado al tanto de mí, los adoro.

A mis amigos de la Facultad: Isa, Ange, Zuen, Adi, Jav, Xam, Juan Pablo, Adrián y Mario, gracias por hacer tan ameno este trayecto de mi vida, por regalarme una sonrisa, una frase de apoyo, un chiste, gracias por darme su amistad y cariño, los quiero mucho.

A la UNAM, por ser mi cobijo desde la infancia, mi gran pasión y mi inspiración para crecer más cada día como persona y como profesionista. Por darme tantas oportunidades para sobresalir a diario. Es un orgullo pertenecer a esta inmensa Institución, gracias.

A Ise por apoyarme en el desarrollo de este trabajo, por esmerarse en mejorarlo, por tomarse tiempo en revisarlo, por sus valiosas aportaciones y comentarios; pero sobre todo gracias por tu amistad.

A mis compañeros y amigos de la Torre de Ingeniería: Frantz, Jon, Petri, Pam, Rulo, Jorge, Belmont, Sorge, Ake, Ernest, Benji, Isra, Mauro, René, Ene, Juan Carlos, Marquito, Columba, Fer y Jesús por hacer que cada día sea diferente y ameno, por permitirme aprender un poco de lo mucho que cada uno sabe.

Al Dr. Alfonso Durán Moreno: por su apoyo para la realización y culminación de este trabajo.

A mis sinodales: Dr. Luis Cedeño y el Ing. Rodolfo Torres, por sus contribuciones a este trabajo.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
3.	OBJETIVOS.....	6
3.1	<i>Objetivo General</i>	6
3.2	<i>Objetivos Particulares</i>	6
4.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
4.1	<i>Residuos Sólidos</i>	7
4.1.1	Análisis elemental de los componentes de los RSU	19
4.1.2	Contenido energético de los componentes de los RSU.....	22
4.1.3	Productos reciclables	25
4.2	<i>Gas de síntesis</i>	27
4.2.1	Composición del gas de síntesis.....	30
4.2.2	Usos del gas de síntesis.....	31
4.3	<i>Importancia de la reducción de emisiones atmosféricas en los procesos térmicos</i>	33
4.4	<i>Pretratamiento de los RSU</i>	36
4.5	<i>Tratamiento de los RSU</i>	42
5.	DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS TÉRMICAS PARA LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS.....	44
5.1	<i>Pirólisis</i>	45
5.2	<i>Gasificación</i>	47
5.2.1	Sistemas de gasificación.....	53
5.2.2	Tecnologías actuales	55
5.3	<i>Tecnología de plasma</i>	59
5.3.1	Generación de un plasma térmico.....	61
5.3.2	Arcos térmicos	62
5.3.3	Aplicaciones industriales del plasma térmico.....	65
5.3.4	Gasificación por plasma térmico	66
5.3.5	Tecnologías actuales	70
5.4	<i>Modelos para describir el proceso de gasificación</i>	72
5.4.1	Simulador HYSYS.....	74
5.4.2	Reactor de Equilibrio	76

6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
6.1	<i>Propuesta de acondicionamiento para los RSU.....</i>	<i>77</i>
6.2	<i>Diferencias entre la gasificación por plasma y la gasificación convencional</i>	<i>79</i>
6.3	<i>Metodología de cálculo para el proceso</i>	<i>82</i>
6.4	<i>Resultados de la simulación</i>	<i>91</i>
7.	CONCLUSIONES	98
8.	PERSPECTIVAS	100
9.	REFERENCIAS	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1.	Clasificación de los residuos no peligrosos, potencialmente peligrosos y peligrosos.	9
Tabla 4.2.	Variación estacional típica observada en la composición de los RSU.....	11
Tabla 4.3.	División de la República Mexicana por regiones geográficas	14
Tabla 4.4.	Producción per cápita de RSU.....	15
Tabla 4.5.	Indicadores promedio de los subproductos presentes en los RSU generados a nivel nacional	17
Tabla 4.6.	Composición de RSU (%peso).....	19
Tabla 4.7.	Composición típica de los RSU	20
Tabla 4.8.	Composición elemental de los RSU.....	20
Tabla 4.9.	Parámetros	21
Tabla 4.10.	Poder calorífico promedio de componentes de RSU.....	24
Tabla 4.11.	Poder calorífico promedio estimado para los RSU.....	25
Tabla 4.12.	Materiales que se han recuperado de los RSU para su reciclaje.	26
Tabla 4.13.	Poder calorífico reportado para el gas de síntesis de acuerdo a algunas compañías	30

Tabla 4.14. Composición del gas obtenido dependiendo del agente gasificante.....	30
Tabla 4.15. Composición del gas de síntesis proveniente de la gasificación con biomasa.	31
Tabla 4.16. Límites máximos permisibles para instalaciones de incineración de residuos	36
Tabla 4.17. Métodos utilizados para el procesamiento y recuperación de componentes individuales de los RSU.....	37
Tabla 5.1. Reacciones clásicas de gasificación y combustión	50
Tabla 5.2. Tipos de gasificadores y sus características	52
Tabla 5.3. Sistemas de gasificación	54
Tabla 5.4. Tecnologías y licenciadores en gasificación y pirólisis.....	55
Tabla 5.5. Clientes de Ebara Company.....	56
Tabla 5.6. Clientes de Thermostelect.....	56
Tabla 5.7. Plantas instaladas con tecnología de las empresas Ebara y Thermostelect, que tratan RSU	58
Tabla 5.8. Contenido de metales en el slag ($\mu\text{g/g}$).....	69
Tabla 5.9. Tecnologías actuales de plasma.	71
Tabla 6.1. Comparación entre la tecnología de gasificación convencional y gasificación por plasma	80
Tabla 6.2. Características de los RSU para la simulación.	84
Tabla 6.3. Resultados del cálculo de la fórmula mínima para la molécula de los RSU	86
Tabla 6.4. Contribución de cada elemento a la molécula	86
Tabla 6.5. Condiciones de alimentación de oxígeno.....	88
Tabla 6.6. Características esperadas del gas de salida (gas de síntesis)	89
Tabla 6.7. Resultados de la simulación	93

Tabla 6.8. Comparación de la composición del syngas (Valores esperados/Valores obtenidos)	94
---	----

Tabla 6.9. Error en la composición del gas de síntesis obtenida	94
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Ciclo de generación de Residuos sólidos Urbanos	8
---	---

Figura 4.2. Clasificación de los residuos peligrosos y no peligrosos.....	9
---	---

Figura 4.3. Ciclo de los residuos sólidos	12
---	----

Figura 4.4. Generación anual de RSU (ton) en el país de 1998 a 2005.	15
---	----

Figura 4.5. Proyección de la generación total de RSU 2004-2020.....	16
---	----

Figura 4.6. Generación de RSU en el País (1998-2005)	17
--	----

Figura 4.7. Caracterización de residuos sólidos urbanos de acuerdo a estudios previos.....	18
--	----

Figura 4.8. Variación de la composición del gas de síntesis con la temperatura a presión constante (29.6 atm).	28
---	----

Figura 4.9. Variación de la composición del gas de síntesis con la presión a temperatura constante (1000°C).....	29
--	----

Figura 4.10. Usos del gas de síntesis como materia prima	33
--	----

Figura 4.11. Pretratamiento de RSU, Valdemingómez-Madrid.	38
--	----

Figura 4.12. Pretratamiento de RSU, secuencia de pasos.....	39
---	----

Figura 4.13. Tecnología empleada para hacer pellets.....	41
--	----

Figura 4.14. “Pellets” de RSU.....	42
------------------------------------	----

Figura 5.1. Laguna de lixiviados de un Relleno Sanitario.....	44
---	----

Figura 5.2. Planta de tratamiento de RSU por medio de pirólisis (termólisis)46	
--	--

Figura 5.3. Proceso de gasificación	48
---	----

Figura 5.4. Creación del gas de plasma	61
Figura 5.5. Diagrama de una antorcha de plasma térmico	62
Figura 5.6. Reducción de RSU a slag	67
Figura 5.7. Algunos usos del slag	68
Figura 5.8. Tratamiento de residuos a través de la gasificación por plasma. 68	
Figura 5.9. Esquema completo del proceso de gasificación por plasma.....	69
Figura 6.1. Pretratamiento propuesto para los RSU	78
Figura 6.2. Características diferenciales.....	81
Figura 6.3. Secuencia de cálculo para elaborar la molécula de RSU	85
Figura 6.4. Secuencia de pasos para la Metodología de cálculo	90
Figura 6.5. Diagrama de flujo del reactor de plasma en el simulador Hysys .	92
Figura 6.6. Balance de materia a la entrada y salida del reactor de plasma ..	96
Figura 6.7. DFP simplificado del sistema de generación de gas de síntesis por arco de plasma	97

1. INTRODUCCIÓN

En el pasado, la producción de residuos no constituía un problema de consideración, pues la disponibilidad de terreno para arrojar los desechos era muy amplia. Sin embargo, con el crecimiento de la población, la modificación de las actividades humanas y el paso del tiempo, el arrojar deliberadamente los desechos en lugares diversos, propició la proliferación de insectos, roedores y microorganismos patógenos [Mora-Reyes, 2004], lo que a su vez originó plagas y pestes. Es entonces cuando las autoridades se percatan de la necesidad de confinar, en un espacio definido, los residuos producidos por las personas, como parte de una medida de salud pública.

La generación diaria de residuos sólidos es un hecho en las sociedades industrializadas y su disposición se está convirtiendo en un problema cada vez mayor. El modelo lineal de la economía humana plantea primero la extracción de materiales en la naturaleza, después procesarlos y convertirlos en bienes, luego consumirlos y finalmente desecharlos. Este modelo parecía útil cuando se trataba de una economía humana pequeña en proporción a la naturaleza. Sin embargo con la contaminación humana en cada rincón del planeta y en gran parte de los recursos de la tierra, resulta muy complicado seguir viendo al planeta como un gran tiradero de basura; por lo que el reto no es solamente encontrar un nuevo método para tratar los residuos sino transformar de manera radical la forma en la cual los materiales circulan en la sociedad. La disposición de residuos sólidos es cada vez menos atractiva y difícil, ya que los sitios para dicha disposición están llegando a su capacidad máxima y los sitios alternos son cada vez más escasos; siendo una realidad la contaminación del agua y sitios adyacentes.

Tanto en las actividades domésticas como en los procesos industriales se utilizan bienes y materias primas para el consumo y la producción de otros bienes, dando lugar a residuos que la naturaleza no puede reabsorber y que constituyen una amenaza de destrucción para el ambiente. Las autoridades encargadas del servicio de limpia se ven rebasadas ante una generación de residuos creciente

provocada por el incremento de la actividad industrial y de la población, así como por el cambio en los hábitos de consumo, que se traduce en la falta de cobertura de los servicios de recolección y en un importante rezago en la instalación de sitios ambientalmente seguros para la disposición final [Chávez, 2001].

Los incineradores y los rellenos sanitarios en un principio parecían soluciones fáciles y útiles para este problema, sin embargo, ahora representan la generación de subproductos tóxicos así como una corriente adicional de residuos que trae consigo un tratamiento posterior; dicho tratamiento se presenta debido a que los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), así como el resto de la materia, no puede ser destruida y las verdaderas soluciones se encontrarán desafiando la noción misma de la basura. Debido a lo anterior en el último siglo los gobiernos de los países han invertido miles de millones de dólares en tecnologías cada vez más sofisticadas con la esperanza de hacer desaparecer la basura.

La gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se define como la disciplina asociada con el control de la generación, almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, procesamiento y evacuación de residuos sólidos de la manera más apegada a la salud pública, la ingeniería, conservación, estética y otras consideraciones ambientales relacionadas intrínsecamente con las expectativas públicas. En este aspecto, la gestión de residuos sólidos se relaciona con diversas funciones como las administrativas, financieras, legales, por mencionar algunas, por lo que en varias ocasiones se vincula con disciplinas complejas como la política, el urbanismo, geografía, economía, salud pública, sociología, demografía, comunicaciones y conservación, así como la ingeniería y ciencia de los materiales.

Para el planteamiento de un sistema de gestión para los residuos sólidos, se deben considerar las seis etapas siguientes, que inician desde el punto de generación hasta la disposición final: 1) generación de residuos, 2) manipulación y separación de residuos, almacenamiento y procesamiento en origen, 3)

recolección, 4) separación, procesamiento y transformación de residuos sólidos, 5) transferencia y transporte, y 6) disposición final.

Debido entonces a los estrechos vínculos que existen entre el planteamiento de una gestión integral y las diversas disciplinas y campos de aplicación en los que se ven involucrados, resulta todo un reto proponer una alternativa para dar solución a un problema tan amplio y que involucra tantos factores. A diario se generan miles de toneladas de residuos sólidos en todo el mundo; existen regiones donde se tiene la visión de separar los residuos con la finalidad de reciclarlos y obtener algún beneficio de ellos, o simplemente para evitar ocasionar un daño al medio ambiente. Incluso en materia legal se han adoptado medidas diversas con la finalidad de mantener un control más estricto sobre el manejo de la basura. Pero tristemente no son medidas adoptadas en todo el mundo y requieren de diversos apoyos para poder llegar a concretarse.

La producción de residuos en México es de aproximadamente un kilogramo por habitante por día, es decir, arriba de 100 millones de kilogramos diarios; lo que significa 36 millones 500 mil toneladas de residuos al año; con lo cual, nuestro país, ocupa el décimo lugar entre los países que más basura generan a nivel mundial.¹

Debido a la magnitud de esta situación, se han buscado alternativas que propicien, en primer lugar la reducción de los volúmenes ocupados por los residuos sólidos producidos y en un segundo plano se plantean alternativas de reciclaje. No obstante, hoy en día se busca que además de los dos planteamientos anteriores, se cuente con procesos limpios y amigables con el ambiente.

La preocupación mundial para reducir los gases de efecto invernadero ha aumentado el interés por el uso de fuentes alternativas de energía; de igual manera, la alta dependencia de nuestro país de combustibles fósiles y la creciente

¹ BALBOA, Juan. "México produce al día 100 mil toneladas de residuos sólidos". La Jornada. México, 2007

atención a la protección del ambiente promueven la apertura de una serie de alternativas energéticas y tecnológicas; reduciendo así los impactos ambientales en la generación de electricidad.

En la búsqueda de una alternativa viable, es necesaria la intervención de los diversos actores involucrados, ya sea la población en general, el sector público en sus niveles federal, estatal y municipal, las empresas privadas, las instituciones educativas, los centros de investigación así como las asociaciones profesionales para que, de manera interrelacionada, se logre una cobertura total del manejo y disposición de los RSU.

Este trabajo se enfoca en el estudio de una alternativa tecnológica conocida como gasificación por arco de plasma térmico, a través de la cual se obtiene un gas de síntesis producto empleado en diversas aplicaciones (para obtención de alcohol, amoníaco, metanol, hidrógeno, gas natural sintético, e incluso para generar electricidad) y cuya materia prima principal son los RSU. Dicho proceso permite solucionar, en primera instancia, el problema de espacio para confinar los RSU así como el aprovechamiento integral de los mismos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente estudio se enfoca en la definición del esquema de proceso para tratar Residuos Sólidos Urbanos (RSU) por medio de la tecnología de gasificación por arco de plasma térmico.

Como primer punto, se definen las características físicas y químicas de los RSU, para posteriormente plantear un pretratamiento adecuado para este tipo de residuos, ya que esta etapa es necesaria como acondicionamiento (condiciones de proceso), a la etapa de reacción que se lleva a cabo en la gasificación. A continuación, se selecciona la tecnología de gasificación por arco de plasma térmico a través de una comparación técnica con otras tecnologías como la gasificación convencional.

El esquema de proceso definido, es simulado con la herramienta de simulación Hysys la cual permite obtener resultados cuantitativos del comportamiento de la gasificación por arco de plasma, en específico de la etapa de reacción. Se obtiene, como producto principal, gas de síntesis a condiciones aptas para utilizarse en diversas aplicaciones.

En el tratamiento y disposición final de los RSU intervienen muchos factores, por lo cual resulta conveniente plantear una alternativa que considere, si no todos, la mayoría de ellos (cantidad de RSU a tratar y características físicas y químicas de los mismos), obteniendo así una propuesta integral que en un futuro sea una posible solución a la problemática actual.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Proponer un esquema de proceso, para producción de gas de síntesis a partir de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

3.2 Objetivos Particulares

1.- Elaborar una propuesta de pretratamiento para los RSU, por medio de un diagrama de bloques, con la finalidad de aumentar la eficiencia del proceso.

2.- Justificar la elección de la tecnología de gasificación por arco de plasma térmico, partiendo de una comparación con la tecnología de gasificación convencional, para tratar RSU.

3.- Definir los beneficios que puede traer consigo la aplicación de la gasificación por arco de plasma térmico para tratar RSU, así como las ventajas y desventajas de la misma.

4.- Por medio de la simulación en Hysys, establecer las condiciones de entrada de cada corriente al reactor de plasma, con la finalidad de obtener el gas de síntesis a las condiciones deseadas o establecidas previamente.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Residuos Sólidos

De manera general los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son aquellos producidos o derivados de actividades humanas y animales, en su mayoría son sólidos y se consideran inútiles. En algunas ocasiones se separan, con la finalidad de reciclarlos propiciando obtener otro uso de los mismos y buscando disminuir tanto el impacto ambiental como el del sector salud.

Desde el punto de vista práctico, debido a la gran cantidad y tipos de fuentes generadoras de residuos sólidos y las características de éstos, es posible clasificarlos desde no peligrosos hasta muy peligrosos. No obstante, resulta necesario que legalmente exista una clara definición y clasificación de los residuos que permita uniformizar el manejo de los mismos. Una gran ventaja sería delimitar las responsabilidades de instituciones normativas y operativas del sector, de los generadores del desecho, del público usuario y de las organizaciones de la sociedad civil. En este contexto, la reciente Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPyGIR, 2003) subsana esta necesidad indicando las siguientes definiciones:

Residuos Sólidos Urbanos (RSU):

Son aquellos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la LGPyGIR como residuos de otra índole².

² Artículo 5, Fracción XXXIII. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. DOF, octubre 2003.

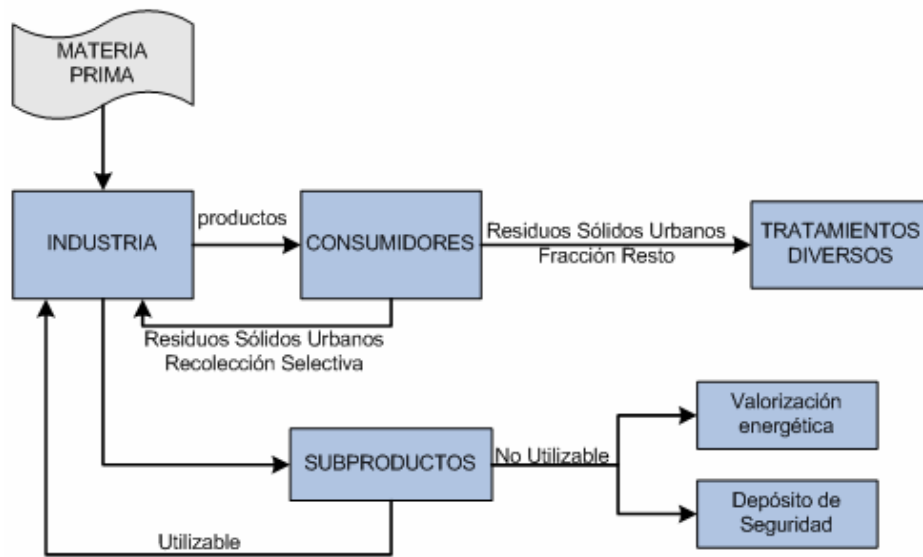


Figura 4.1. Ciclo de generación de Residuos sólidos Urbanos

FUENTE: Layda, 2006.

Residuos de Manejo Especial:

Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

Residuos Peligrosos:

Son aquellos que poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad (CRETIB), así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con los que establece la LGPyGIR.

Considerando lo anterior, como residuos no peligrosos se encontrarían los residuos sólidos urbanos y los de manejo especial. Dependiendo de la fuente

generadora los residuos sólidos pueden dividirse de acuerdo a la Figura 4.2 [Tchobanoglous et al, 1994].

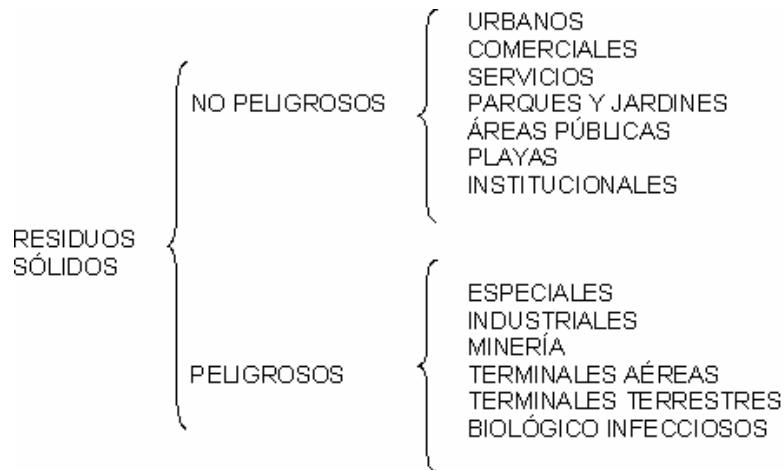


Figura 4.2. Clasificación de los residuos peligrosos y no peligrosos.

En el presente trabajo se considera el término “Residuos Sólidos Urbanos (RSU)” como equivalente a residuos sólidos municipales, de acuerdo a la definición establecida por la LGPyGIR. Una clasificación más específica de los residuos sólidos se puede observar en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1. Clasificación de los residuos no peligrosos, potencialmente peligrosos y peligrosos.

Fuente	Origen Específico	Residuos	
INSTITUCIONALES	<ul style="list-style-type: none"> Escuelas nivel básico (preescolar a secundaria) Educación preuniversitaria a educación superior Museos Iglesias Oficinas de Gobierno Patrimonio Histórico Bancos Reclusorios 	NO PELIGROSOS	
		<ul style="list-style-type: none"> Vidrio Papel Cartón Plástico Tetrapack Chácharas Material inerte Textiles naturales, sintéticos 	<ul style="list-style-type: none"> Residuos alimenticios, de jardinería Enseres domésticos Material ferroso y no ferroso Madera Hueso Desecho de flores

Fuente	Origen Específico	Residuos	
<p style="text-align: center;">ÁREAS Y VÍAS PÚBLICAS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Calles y Avenidas • Carreteras federales y estatales • Parques y jardines • Áreas abiertas • Zonas federales • Balnearios • Zoológicos • Playas • Áreas arqueológicas • Parques Nacionales 	POTENCIALMENTE PELIGROSOS	
		<ul style="list-style-type: none"> • Excremento • Secreciones Sanitarias • Algodón contaminado • Aceites y grasas • Autos abandonados 	<ul style="list-style-type: none"> • Pañales • Envases plaguicidas, aerosoles • Animales muertos
<p style="text-align: center;">COMERCIALES Y DE SERVICIO</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mercados, tianguis y centros de abasto • Hoteles y Moteles • Oficinas • Rastros • Panteones • Restaurantes • Tiendas • Espectáculos • Presentaciones artísticas • Circos • Cines • Teatros • Estadios, hipódromo, galgódromo • Parques deportivos • Autódromo, velódromo • Toros • Frontón • Terminales marítimas, autobuses, aéreas • Talleres 	PELIGROSOS	
		<ul style="list-style-type: none"> • Sustancias químicas de laboratorios de enseñanza • Animales de investigación • Residuos de medicamentos • Solventes • Papel con excremento de contagio • Cuerpos de animales muertos enfermos • Medicinas caducas • Alimentos enlatados o a granel caducos 	

FUENTE: Pacheco, 1994.

Algunos de los factores que permiten la diversidad en la composición de los RSU son:

- El grado de urbanización e industrialización de la zona
- Costumbres Sociales
- Hábitos y Costumbres alimenticias
- Status económico de los generadores
- Época del año
- Clima

Las variaciones estacionales afectan directamente en la composición porcentual de los RSU, en la Tabla 4.2 se puede observar dicha variación.

Tabla 4.2. Variación estacional típica observada en la composición de los RSU

Tipo de Residuo	Porcentaje en peso		Variación porcentual ^a	
	Invierno	Verano	Decremento	Incremento
Residuos de comida	11.1	13.5	—	21.6
Papel	45.2	40.0	11.5	—
Plásticos	9.1	8.2	9.9	—
Otros orgánicos	4.0	4.6	—	15.0
Residuos de jardín	18.7	24.0	—	28.3
Vidrio	3.5	2.5	28.6	—
Metales	4.1	3.1	24.4	—
Inertes y otros residuos	4.3	4.1	4.7	—
Total	100	100		

^a Basado en la temporada de Invierno

FUENTE: Tchobanoglous, 1994.

Los valores típicos para los Coeficientes de Variación en porcentaje para el papel en los RSU varían de un 40% a un 100%. Para los componentes restantes en el flujo de residuos, los valores del Coeficiente de Variación, pueden oscilar de un 40% a un 100%.

Como hemos podido apreciar, los RSU presentan una gran variabilidad en cuanto a sus características físicas, químicas y biológicas, por lo que el tratamiento, manejo y disposición final, representan un gran desafío; pues implican demanda de personal, así como estrategias y tecnología adecuada al volumen y características. Exceptuando una pequeña porción de materiales tóxicos como pinturas, pilas, vinilo/PVC, por dar algunos ejemplos; en general los RSU se consideran como no peligrosos [Neil, 2005]. Su composición varía de acuerdo al nivel de ingresos de las personas, al clima, cultura, es decir, que intervienen diversos factores; se componen principalmente de porciones de restos de comida,

desechos de jardín, papel, vidrio, cartón, metales y plásticos. Sin embargo, el posible valor que se les da a estos productos por separado, se pierde al momento de que se mezclan y contaminan con materiales tóxicos.

Por lo anterior, los RSU pasan por una serie de etapas desde la generación, almacenamiento, barrido, recolección y transporte, transferencia; tratamiento y disposición final; la acción conjunta de todas estas actividades conforma un ciclo para los residuos sólidos y se puede observar en la Figura 4.3:

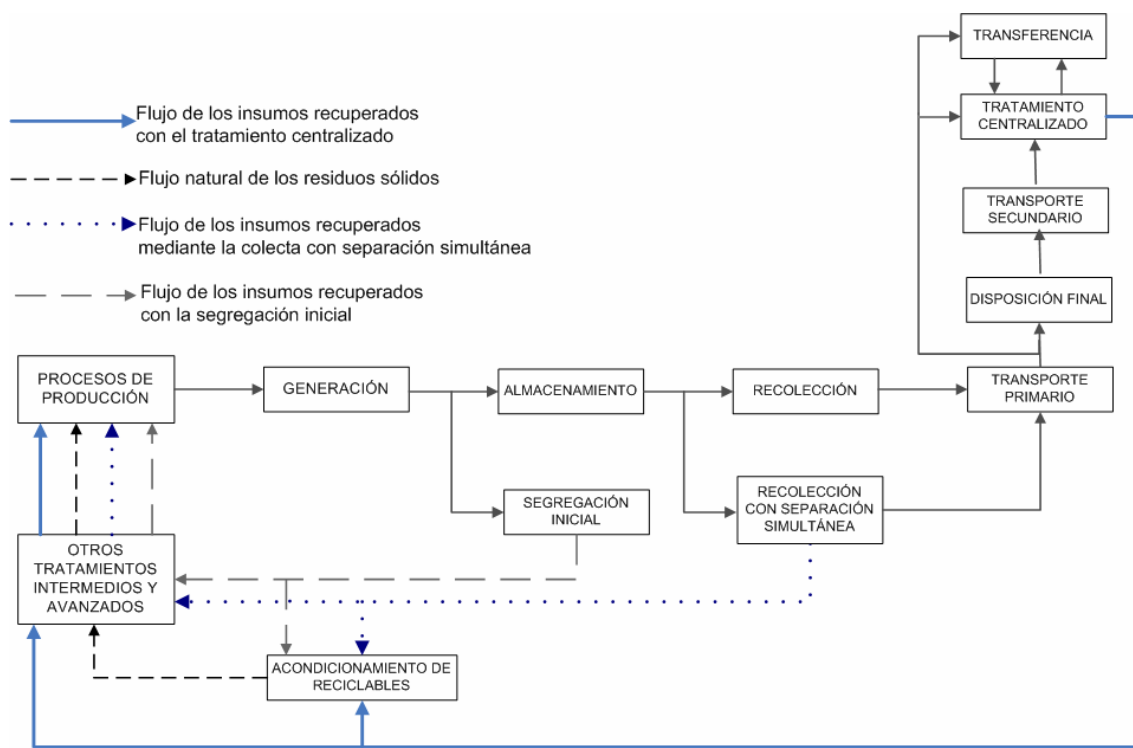


Figura 4.3. Ciclo de los residuos sólidos

FUENTE: SEMARNAP, 1996.

Los RSU en general, presentan características físicas, químicas y biológicas distintas. Dentro de las características físicas podemos encontrar la separación de los subproductos que conforman los RSU. En la norma mexicana NMX-AA-022-1985, se encuentra una metodología de separación de dichos subproductos, la cual se recomienda para estudios encaminados al aprovechamiento de RSU o para la caracterización de los mismos.

Las características físicas más importantes de los RSU, incluyen: peso específico, contenido de humedad, tamaño de partícula y distribución del tamaño, capacidad de campo y porosidad de los residuos compactados.

La información sobre la composición química de los componentes que conforman los RSU es importante evaluar las opciones de procesamiento y recuperación. Si los residuos van a utilizarse como combustible, existen cuatro importantes propiedades que se requiere conocer: 1) Análisis físico, 2) punto de fusión de las cenizas, 3) análisis elemental y 4) contenido energético.

Excluyendo el plástico, la goma y el cuero, la fracción orgánica de la mayoría de los RSU se puede clasificar de la siguiente forma:

- 1) Constituyentes solubles en agua, tales como azúcares, féculas, aminoácidos y diversos ácidos orgánicos.
- 2) Hemicelulosa, un producto de condensación de azúcares con cinco y seis carbonos.
- 3) Celulosa, un producto de condensación de glucosa de azúcar con seis carbonos.
- 4) Grasas, aceites y ceras, que son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
- 5) Lignina, un material polímero que contiene anillos aromáticos con grupos metoxi ($-\text{OCH}_3$), cuya fórmula exacta aún no se conoce (está presente en papel periódico).
- 6) Lignocelulosa, una combinación de lignina y celulosa.
- 7) Proteínas, que están formadas por cadenas de aminoácidos.

La característica biológica más importante de la fracción orgánica de los RSU es que casi todos los componentes orgánicos pueden convertirse biológicamente en gases y sólidos orgánicos e inorgánicos [Tchobanoglous, 1994].

Las características de los RSU varían de región en región. A continuación (Tabla 4.3), se muestra una zonificación de nuestro país de acuerdo a sus características geográficas; con la finalidad de obtener indicadores regionales que permitan identificar de una manera más práctica los índices de generación de los RSU así como su composición porcentual. De acuerdo al INEGI³, la división de la República Mexicana se realiza en cinco grandes regiones geográficas, que abarcan todos los estados que la conforman.

Tabla 4.3. División de la República Mexicana por regiones geográficas

REGIÓN	ESTADOS
CENTRO	Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán de Ocampo, Morelos, Puebla, Querétaro Arteaga, Tlaxcala y Veracruz de Ignacio de la Llave
DISTRITO FEDERAL	Distrito Federal
NORTE	Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila de Zaragoza, Durango, Nayarit, Nuevo León, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas y Zacatecas.
SUR	Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán.
FRONTERA NORTE	Incluye los municipios de Baja California, Sonora, Coahuila de Zaragoza, Chihuahua, Nuevo León y Tamaulipas, que están dentro de la franja de 100 km, (a partir del 2005 se extiende a 300 Km), al Sur del límite internacional con los Estados Unidos de América.

FUENTE: INEGI, 2007.

En la Tabla 4.4, se muestran los valores de generación de RSU en kilogramos por habitante por día y la generación anual en toneladas para el año 2005.

³ INEGI: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, consultado en agosto 2007.

Tabla 4.4. Producción per cápita de RSU

REGIÓN	Generación per cápita diaria (kg/hab/día)	Generación anual (ton)
CENTRO	0.882	17 795 575
DISTRITO FEDERAL	1.414	4 549 725
NORTE	0.774	3 912 800
SUR	0.697	3 533 200
FRONTERA NORTE	1.048	5 5591 800

FUENTE: INEGI, 2007.

La producción de RSU en el país aumenta cada año, en estudios que ha realizado el INEGI, se puede ver que esta suposición es cierta y se corrobora por medio del siguiente gráfico, que presenta la tendencia en la producción anual en toneladas de RSU en nuestro país.

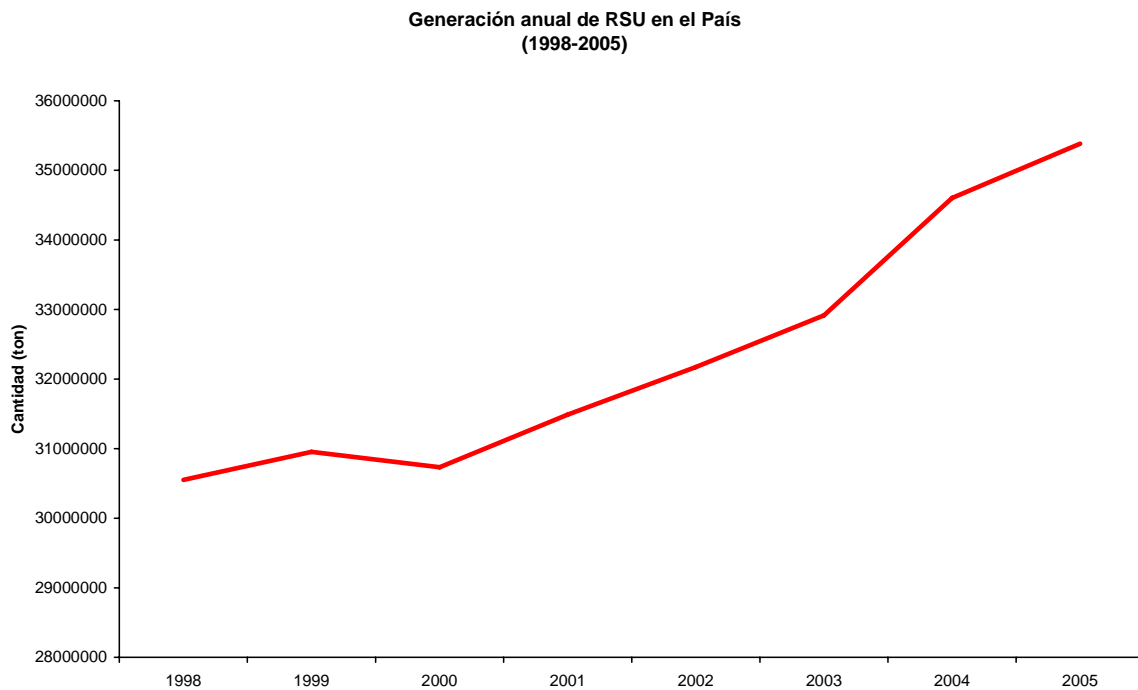


Figura 4.4. Generación anual de RSU (ton) en el país de 1998 a 2005.

FUENTE: INEGI, 2007.

De acuerdo a la Figura 4.4, la tendencia de producción de RSU en nuestro país va en aumento, pasando en 7 años de casi 30.5 millones de toneladas a 35.3

millones de ton/año, lo que sugiere que en un futuro la generación de RSU aumentará de forma prácticamente lineal, como se puede observar en la Figura 4.5.

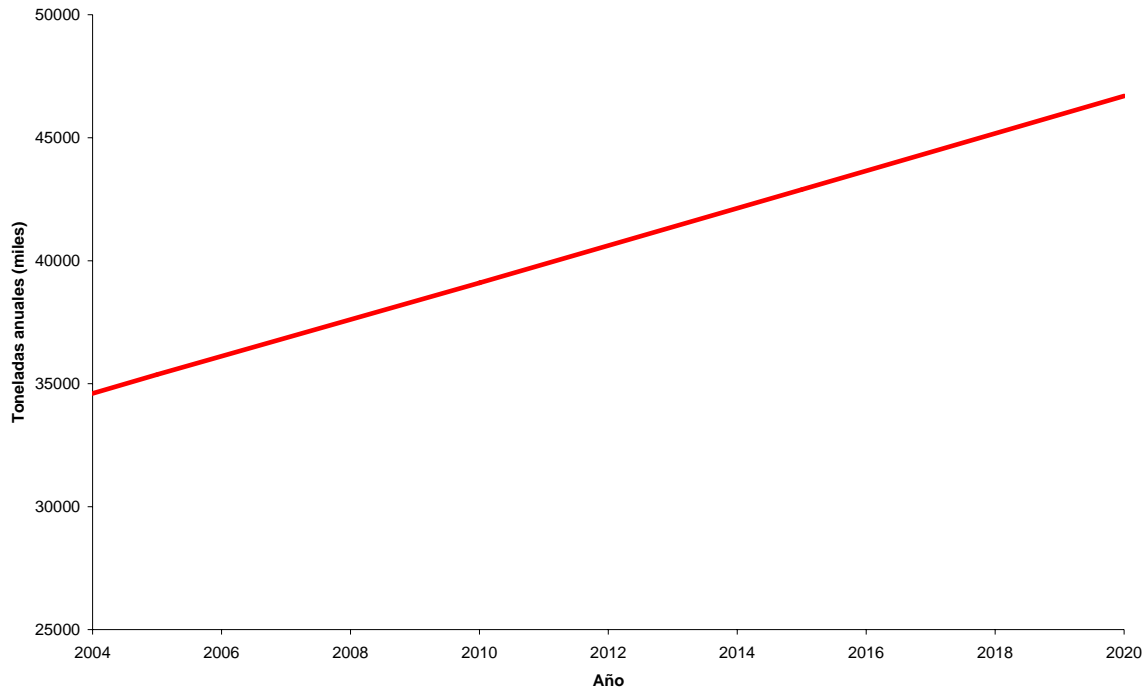


Figura 4.5. Proyección de la generación total de RSU 2004-2020
FUENTE: Elaboración propia a partir de SEDESOL, 2004.

Esta producción varía de acuerdo a las regiones señaladas; de las cuales, la región que más residuos genera anualmente es el DF, como se puede ver en la Figura 4.6.

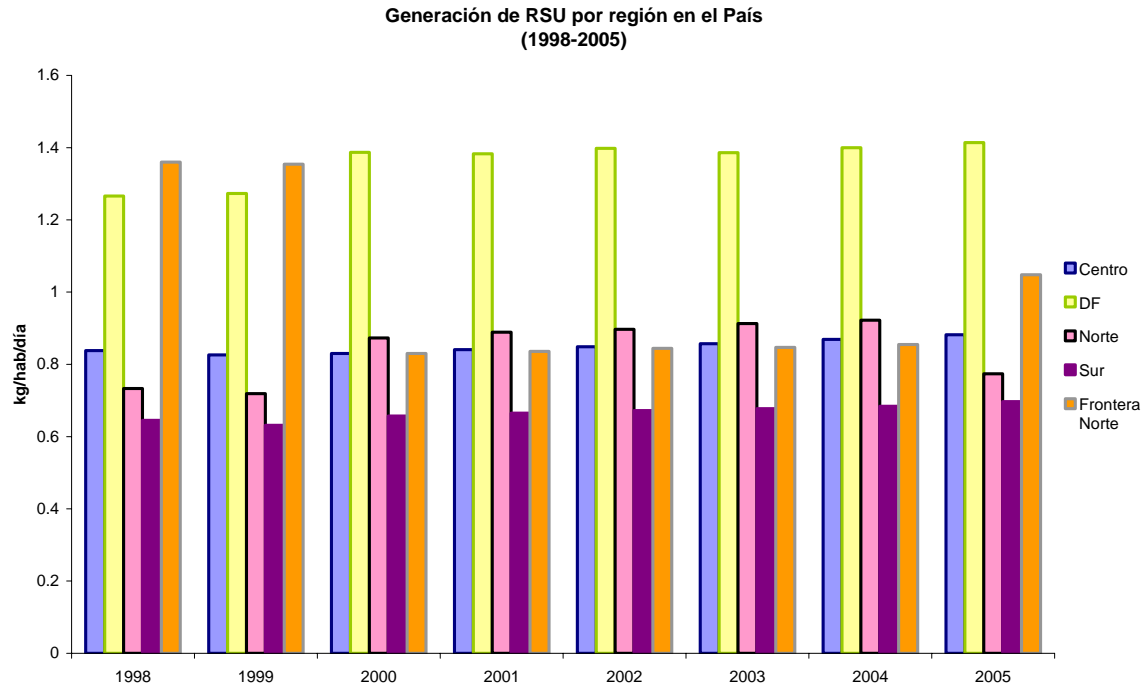


Figura 4.6. Generación de RSU en el País (1998-2005)

FUENTE: Elaboración propia a partir de INEGI, 2007.

También se han realizado caracterizaciones de los RSU, con el objetivo de tener una idea clara sobre la composición promedio de los mismos. La Tabla 4.5, muestra indicadores promedio de subproductos presentes en los RSU a nivel nacional.

Tabla 4.5. Indicadores promedio de los subproductos presentes en los RSU generados a nivel nacional

Subproducto	% masa
Papel y Cartón	14.2
Plástico	5.8
Metales	3.1
Textiles	1.2
Vidrio	6.6
Residuos Alimenticios	31.6
Residuos de Jardinería	9.8
Otros	27.7

FUENTE: INE/SEDESOL, 2007.

A pesar de que la composición de los RSU es muy variada, se pueden tener parámetros generales, que permiten conocer los componentes principales de los residuos, la distribución o aporte de cada componente se muestra en la Figura 4.7.

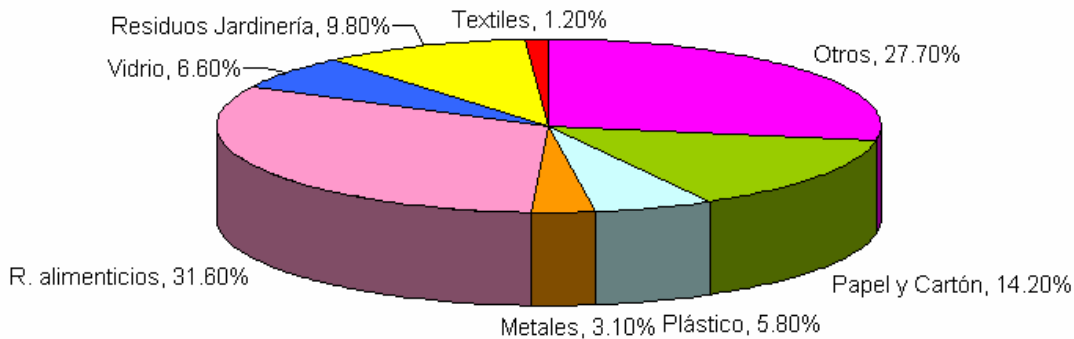


Figura 4.7. Caracterización de residuos sólidos urbanos de acuerdo a estudios previos.

FUENTE: INE/SEDESOL, 2007.

Un aspecto que resulta relevante, es que la composición y presencia de determinados subproductos en los RSU, en especial los provenientes de domicilios, se relaciona directamente con factores que se han mencionado ya como la época del año, festejos locales, patrones de consumo, aspectos culturales, actividad económica de la región y/o zona donde se localicen, entre otros.

De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL)⁴ [2002], la composición de los RSU a nivel nacional es prácticamente constante, con un contenido de materia orgánica del 52% para 1992 y del 52.4% para el 2001. Sin embargo, la composición de los RSU está en función de la región del país que se esté considerando.

De manera comparativa, la Tabla 4.6, muestra la composición de los RSU en la zona centro del país (Ver Tabla 4.3) y en el Distrito Federal. A pesar de que la zona centro está conformada por un mayor número de entidades, podemos ver que en algunos subproductos (cartón, hule, material ferroso, papel, plástico

⁴ SEDESOL, Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Ordenación del Territorio, 2002.

película, plástico rígido y vidrio transparente) el Distrito Federal supera la composición de estos subproductos en los RSU.

Tabla 4.6. Composición de RSU (%peso)

SUBPRODUCTO	CENTRO	DF
Cartón	1.83	5.36
Residuos finos	3.51	1.21
Hueso	0.27	0.08
Hule	0.09	0.20
Lata	1.70	1.58
Material ferroso	0.29	1.39
Material no ferroso	0.94	0.06
Papel	13.68	14.58
Pañal desechable	6.01	3.37
Plástico película	1.66	6.24
Plástico rígido	1.95	4.33
Residuos alimenticios	38.54	34.66
Residuos de jardinería	7.11	5.12
Trapo	0.81	0.64
Vidrio de color	4.25	4.00
Vidrio transparente	5.051	6.77
Otros	12.33	10.41
TOTAL	100.00	100.00

FUENTE: SEDESOL, 1999.

4.1.1 Análisis elemental de los componentes de los RSU

Dentro de un análisis elemental, se encuentra la determinación del porcentaje de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre y Ceniza; en algunas ocasiones se incluye la determinación de halógenos dentro de este análisis, ya que contribuyen a la emisión de compuestos clorados durante la combustión.

La composición típica de los RSU se muestra en la Tabla 4.7.

Estos valores son de utilidad para la caracterización de la materia orgánica contenida en los RSU, ejemplo de este análisis se encuentra reportado en el Perry's Chemical Engineer's Handbook en la Tabla 4.8.

Tabla 4.7. Composición típica de los RSU

Componente	Masa (%)
C	41.41
H	5.68
O	28.22
N	0.75
S	0.27
Cenizas	23.67

FUENTE: Adaptado de Perry's Chemical Engineer's Handbook, 1984.

Tabla 4.8. Composición elemental de los RSU.

Componente	Masa (%), base seca					
	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Comida y productos de comida						
Grasas	73.0	11.5	14.8	0.4	0.1	0.2
Residuos de comida (mezclados)	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Residuos de frutas	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2	4.2
Residuos de carne	59.6	9.4	24.7	1.2	0.2	4.9
Productos de papel	45.4	6.1	42.1	0.3	0.1	6.0
Papel carbón	43.0	5.9	44.8	0.3	0.2	5.0
Revistas	32.9	5.0	38.6	0.1	0.1	23.3
Papel periódico	49.1	6.1	43.0	<0.1	0.2	23.3
Papel mezclado	43.4	5.8	44.3	0.3	0.2	6.0
Cartones encerados	59.2	9.3	30.1	0.1	0.1	1.2
Plásticos						
Plásticos mezclados	60.0	7.2	22.8	—	0.3	6.3
Poliétileno	85.2	14.2	—	<0.1	0.1	1.0
Poliestireno	87.1	8.4	4.0	0.2	<0.1	0.9
Poliuretano*	63.3	6.3	17.6	6.0	<0.1	1.5
Policloruro de vinilo*	45.2	5.6	1.6	0.1	<0.1	0.4
Textiles, madera.						
Residuos de jardín	46.0	6.0	38.0	3.4	0.3	6.3
Madera verde	50.1	6.4	42.3	0.1	0.1	1.0
Madera dura	49.6	6.1	43.2	0.1	<0.1	0.9
Madera (mezclada)	49.5	6.0	42.7	0.2	<0.1	1.5
Trazas de madera (mezclada)	48.1	5.8	45.5	0.1	<0.1	0.4
Vidrio, metales.						
Vidrio y minerales**	0.5	0.1	0.4	<0.1	—	98.9
Metales (mezclados)	4.5	0.6	4.3	<0.1	—	90.5
Cuero, caucho, textiles						
Cuero (mezclado)	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
Caucho (mezclado)	69.7	8.7	—	—	1.6	20.0
Textiles (mezclado)	48.0	6.4	40.0	2.2	0.2	3.2

Componente	Masa (%), base seca					
	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Misceláneos						
Barreduras de oficina	24.3	3.0	4.0	0.5	0.2	68.0
Aceites, pinturas	66.9	9.6	5.2	2.0	—	16.3
Combustible derivado de residuos (CDR)	44.7	6.2	38.4	0.7	<0.1	9.9

Adaptado en parte de D. G. Wilson (ed.), *Handbook of Solid Waste Management*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1977, y G. Thobanoglous H. Theisen, and R. Eliassen, *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 1977.

* El resto es cloro.

** El contenido orgánico es de etiquetas, recubrimientos y otros materiales adjuntos.

FUENTE: Perry's Chemical Engineer's Handbook, 1984.

La Tabla 4.9, muestra los resultados de un estudio realizado por la Dirección Técnica de Desechos Sólidos⁵, el cual es una compilación de experiencias de diversos autores y de un número considerable de determinaciones, con la finalidad de encontrar una tendencia en el comportamiento de los RSU, por lo que se consideran confiables. A diferencia de la Tabla 4.8, en la Tabla 4.9 se pueden apreciar los parámetros de humedad y poder calorífico (del cual se hablará con detalle más adelante).

Tabla 4.9. Parámetros

SUBPRODUCTOS	HUMEDAD	P. CALORIFICO (BTU/lb*)	CARBONO (%)	HIDRÓGENO (%)	OXÍGENO (%)	NITRÓGENO (%)
Algodón	10.00	6900	55.00	6.60	31.20	4.12
Cartón	5.00	7000	44.00	5.90	44.60	0.38
Cuero	10.00	7500	60.00	8.06	11.61	10.00
Residuos finos	3.20	3678	20.62	2.57	4.00	8.58
Fibra vegetal	12.00	6500	43.4	6.10	43.70	0.10
Fibra sintética	15.00	7500	46.19	6.41	41.05	2.10
Hueso	0.00	7000	41.72	5.75	27.62	2.97
Hule	2.00	10000	77.65	10.35	0.00	2.00
Lata	3.00	300	4.47	6.00	4.30	0.05
Loza y cerámica	8.00	3000	26.30	3.00	2.00	0.50
Madera	20.00	8000	43.50	6.00	42.70	0.20
Material de construcción	8.00	3000	26.30	3.00	2.00	0.50
Material ferroso	3.00	300	4.54	8.63	4.20	0.05
Material no ferroso	2.00	300	4.47	6.00	4.36	0.05
Papel	6.00	7200	43.50	6.00	44.00	0.30
Pañal desechable	3.00	14000	60.00	7.20	22.00	0.00
Plástico de película	3.00	14000	67.21	9.72	15.02	0.46

⁵ Departamento de la Dirección General de Servicios Urbanos del Departamento del Distrito Federal.

SUBPRODUCTOS	HUMEDAD	P. CALORIFICO (BTU/lb*)	CARBONO (%)	HIDRÓGENO (%)	OXÍGENO (%)	NITRÓGENO (%)
Plástico rígido	0.20	19677	84.54	14.10	8.00	0.86
Poliuretano	0.20	11288	63.27	6.26	17.65	5.99
Poliestireno expandido	0.20	16400	87.10	0.45	3.96	0.21
Residuo alimenticio	70.00	2000	40.00	6.00	37.68	2.60
Residuo de jardinería	60.00	2000	47.00	6.00	38.00	3.40
Envases de cartón	1.45	11300	59.10	9.25	30.13	0.17
Trapo	10.00	6900	55.00	6.60	31.28	4.12
Vidrio de color	2.00	60	0.52	0.07	0.36	0.03
Vidrio transparente	2.00	60	0.52	0.07	0.36	0.03
Otros	4.34	300	4.54	0.63	4.28	0.05

*1 BTU/lb = 2.33 kJ/kg

FUENTE: Pacheco, 1994.

4.1.2 Contenido energético de los componentes de los RSU

Otro parámetro que resulta significativo, es el contenido energético de los RSU, ya que es un indicador del aporte energético que darán los RSU en caso de emplearse para obtener energía o algún otro producto similar. El contenido energético se puede conocer por varios métodos, dentro de los cuales se encuentran: el uso de una caldera a escala real (calorímetro), uso de una bomba calorimétrica de laboratorio y por cálculo, en caso de que se conozca previamente la composición elemental. La mayoría de los resultados que se han reportado, se obtuvieron por medio de ensayos con una bomba calorimétrica.

El Poder Calorífico (PC) que se puede obtener de los RSU, expresa la cantidad de calor desprendida en la combustión de una unidad de peso de este residuo y se puede expresar en kcal/kg.

Existen dos tipos de poder calorífico: El Poder Calorífico Superior (PCS), también llamado total, que es el calor producido en la combustión de una cantidad unitaria de combustible sólido bajo volumen constante, dentro de una bomba calorimétrica en condiciones específicas tales que toda el agua de los productos permanezca en estado líquido. El Poder Calorífico Inferior (PCI), también llamado neto, se calcula a partir del poder calorífico superior y equivale al calor producido por la

combustión de una cantidad unitaria de un combustible sólido en condiciones constantes de presión y condiciones específicas tales que toda el agua de los productos permanezca en forma de vapor⁶.

Cuando el combustible no tiene hidrógeno, entonces no es posible la formación de agua y esto implicaría que el Poder Calorífico Superior sea igual al Poder Calorífico Inferior (PCS=PCI). La determinación del Poder Calorífico se puede realizar directamente o de manera teórica.

1. Directamente: Por medio del calorímetro y con ayuda de una bomba calorimétrica; teniendo en cuenta que el calor cedido será igual al calor absorbido.
2. Teóricamente: Aplicando la Ley de Hess (calores de reacción en una reacción química). El proceso de combustión se puede expresar mediante: $Q_{react} = \Delta H_{react} - \Delta H_{productos}$.

Para obtener una buena caracterización de los RSU, es necesario tomar una muestra representativa, lo cual implica tener un adecuado proceso previo de colección de la misma⁷. Un punto relevante, es que aún cuando se tuviese continuidad de recolección de muestras durante un año, esto no garantizaría de ninguna manera que los años subsiguientes sean similares entre ellas o que exista un incremento en la calidad energética de los RSU colectados, ya que, existen factores que influyen directamente sobre la composición de los RSU, tales como los hábitos de consumo, temporada del año y procedencia de la muestra.

La Tabla 4.10, se presentan datos de referencia para el cálculo del poder calorífico promedio para una composición específica de RSU [Perry, 1984].

⁶ Norma Oficial Mexicana NMX-AA-033-1985

⁷ Se puede considerar el proceso que plantea la NMX-AA-022-1985.

En la Tabla 4.11 se reportan valores de poder calorífico de acuerdo al tipo de residuo componente en una mezcla de RSU [Secretaría de Ecología, 1999]⁸.

Tabla 4.10. Poder calorífico promedio de componentes de RSU

Componente	Contenido energético, kJ/kg			Datos de análisis para componentes Domésticos, Comerciales y Residuos sólidos industriales					
	Como se colecta	Seco	Húmedo y libre de cenizas	Porcentaje en masa (base seca)					
				Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Comida y productos de la comida									
grasas	37530	38296	38374	73	11.5	14.8	0.4	0.1	0.2
residuos de comida (mezcla)	4175	13917	16700	48	6.4	37.6	2.6	0.4	5
residuos de fruta	3970	18638	19271	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2	4.2
residuos de carne	17730	28970	13516	59.6	9.4	24.7	1.2	0.2	4.9
PROMEDIO	15851	24955	21965	57.28	8.38	29.15	1.40	0.23	3.58
PROMEDIO kcal/kg	3787	5962	5247						
Productos del papel									
revistas	12220	17278	18240	43	5.9	44.8	0.3	0.2	5
tarjetas	16380	12742	16648	32.9	5	38.6	0.1	0.1	23.3
dianios	18550	19734	20032	49.1	6.1	43	0.1	0.2	23.3
papel (mezclado)	15815	17611	18738	43.4	5.8	44.3	0.3	0.2	6
cartón	26345	27272	27615	59.2	9.3	30.1	0.1	0.1	1.2
PROMEDIO	19273	19340	20758	46.15	6.55	39	0.15	0.15	13.45
PROMEDIO kcal/kg	4604	4620	4959						
Plásticos									
plásticos (mezclados)	32000	32064	32720	60	7.2	22.8			10
polietileno	43465	43552	44082	85.2	14.2		0.1	0.1	0.4
poliestireno	38190	38266	38216	87.1	8.4	4	0.2		0.3
poliuretano	26060	26112	27316	63.3	6.3	17.6	6	0.1	4.3
cloruro de polivinil	22690	22735	23224	45.2	5.6	1.6	0.1	0.1	2
PROMEDIO	32601	32666	33210	70.20	8.63	7.73	1.60	0.10	1.75
PROMEDIO kcal/kg	7788	7804	7933						
Madera, árboles, etc.									
Abetos	6050	15125	15316	46	6	38	3.4	0.3	6.3
Madera verde	4885	9770	9848	50.1	6.4	42.3	0.1	0.1	1
troncos	17100	19432	19542	49.6	6.1	43.2	0.1	0.1	0.9
Madera (mezcla)	15444	19344	19500	49.5	6	42.7	0.2	0.1	1.5
Aserrín				48.1	5.8	45.5	0.1	0.1	0.4
PROMEDIO	10870	15918	16052	48.80	6.13	41.55	0.95	0.15	2.43
PROMEDIO kcal/kg	2597	3803	3835						
Piel, goma, textiles, etc									
piel (mezcla)	18515	20572	22858	60	8	11.6	10	0.4	10
goma (mezcla)	25330	25638	28493	69.7	8.7			1.6	20
textiles (mezcla)	17445	19383	20892	48	6.4	40	2.2	0.2	3.2
PROMEDIO	20430	21864.333	24081	59.23	7.70	25.80	6.10	0.73	11.07
PROMEDIO kcal/kg	4881	5223	5753						
Vidrio, metales, etc									
Vidrio y minerales	196	200	200	0.5	0.1	0.4			98.9
metal, latas	1425	1500	1500	4.5	0.6	4.3			90.5
metales ferrosos									
metales no ferrosos									
PROMEDIO	810.5	850	850	2.50	0.35	2.35			94.70
PROMEDIO kcal/kg	194	203	203						
Misceláneos									
Papelaría de oficina	8535	8817	31847	24.3	3	4	0.5	0.2	68
PROMEDIO	8535	8817	10967	13.40	1.68	3.18	0.50	0.20	81.35
PROMEDIO kcal/kg	2039	2106	2620	3.20					
Múltiples desechos									
PROMEDIO	10470	13090	17450	66.9	9.6	5.2	2		16.3
PROMEDIO kcal/kg	2501	3127	3756	6.44	4.76	4.13	1.00	0.20	55.22
Desechos Industriales									
PROMEDIO	11630	13682	17892	44.7	6.2	38.4	0.7	0.1	9.9
PROMEDIO kcal/kg	11630	13682	13705	36.25	6.85	15.91	1.23	0.15	27.14
PROMEDIO kcal/kg	2778	3269	3274	8.66					
PROMEDIO GLOBAL	12762	15671	16162	39.59	5.82	22.55	1.81	0.27	29.65
PROMEDIO GLOBAL kcal/kg	3049	3744	3861						

FUENTE: Modificado de Perry's Chemical Engineer's Handbook, 1984.

⁸ "Análisis del mercado de los Residuos Sólidos Municipales Reciclables y Evaluación de su Potencial Desarrollo"

Tabla 4.11. Poder calorífico promedio estimado para los RSU.

Subproductos	Humedad (%)	P. Calorífico (BTU/lb)	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno
Hueso	0	7000	41.72	5.75	27.62	2.97
Hule	2	10000	77.65	10.35	0	2
Lata	3	300	4.47	6	4.3	0.05
Loza y cerámica	8	3000	26.3	3	2	0.5
Madera	20	8000	43.5	6	42.7	0.2
Material de construcción	8	3000	26.3	3	2	0.5
Material ferroso	3	300	4.54	8.63	4.2	0.05
Material no ferroso	2	300	4.47	6	4.36	0.05
Papel	6	7200	43.5	6	44	0.3
Pañal desechable	3	14000	60	7.2	22	0
Plástico de película	3	14000	67.11	9.72	15.02	0.46
Plástico rígido	0.2	19677	84.54	14.1	8	0.86
Poliuretano	0.2	11288	63.27	6.26	17.65	5.99
Poliestireno expandido	0.2	16400	87.1	0.45	3.96	0.21
Residuo alimenticio	70	2000	40	6	37.68	2.6
Residuo de jardinería	60	2000	47	6	38	3.4
Envases de cartón	1.45	11300	59.1	9.25	30.13	0.17
Trapo	10	6900	55	6.6	31.28	4.12
Vidrio de color	2	60	0.52	0.07	0.36	0.03
Vidrio transparente	2	60	0.52	0.07	0.36	0.03
Otros	4.34	300	4.54	0.63	4.28	0.05
PROMEDIO		6528	40.05	5.77	16.19	1.17
PROMEDIO (kcal/kg)		3627				

FUENTE: Secretaría de Ecología, 1999.

4.1.3 Productos reciclables

De todos los componentes que conforman los RSU, hay una gran parte que se puede reciclar para obtener algún tipo de beneficio comercial; los materiales que habitualmente son aprovechados se muestran en la Tabla 4.12, asimismo se enlistan los posibles usos de cada uno.

Tabla 4.12. Materiales que se han recuperado de los RSU para su reciclaje

Material Reciclable	Tipos de materiales y usos
Aluminio	Latas de cerveza y refrescos
Papel Papel de periódico usado Cartón ondulado Papel de alta calidad Papel mezclado	Periódicos de quiosco o entregados a casa Empaquetamiento en bruto; la mayor fuente de papel residual para reciclaje Papel de informática, hojas de cálculo en blanco, recortes Varias mezclas de papel limpio, incluyendo papel periódico, revistas y papel de fibras largas blanco o de color
Plásticos Polietileno tereftalato (PET/1) Polietileno de alta densidad (PE-HD/2) Polietileno de baja densidad (PE-BD/4) Polipropileno (PP/5) Poliestireno (PS/6) Multilaminados y otros Plásticos mezclados	Botellas de refrescos, de mayonesa y aceite vegetal; película fotográfica Bidones de leche, contenedores de agua, botellas de detergente y de aceite de cocina Envases de película fina y rollos de película fina para envolturas; bolsas de limpieza en seco y otros materiales de película Cierres y etiquetas para botellas y contenedores, cajas de materias, envolturas para pan y queso, bolsas para cereales Envases para componentes electrónicos y eléctricos, cajas de espuma, envases para comida rápida, cubiertos, vajillas y platos para microondas Envases multilaminados, botellas de ketchup y mostaza Diversas combinaciones de lo anteriormente mencionado
Vidrio	Botellas y recipientes de vidrio blanco, verde y ámbar
Metal férreo	Lastas de hojalata, bienes de línea blanca y otros productos
Metales no férreos	Aluminio, cobre, plomo.
Residuos de jardín, recogidos separadamente	Utilizados para separar composta; combustible biomasa; cubrimiento intermedio de vertederos
Fracción orgánica de los RSU	Utilizado para preparar composta para aplicaciones de suelo; como cubrimiento intermedio de vertederos; metano, etanol y otros compuestos orgánicos; combustible derivado de residuos (CDR)
Residuos de construcción y demolición	Suelo, asfalto, hormigón, madera, cartón de yeso, grava, metales
Madera	Materiales para empaquetamiento, palets, restos y

Material Reciclable	Tipos de materiales y usos
	madera usada de proyectos de construcción
Aceite residual	Aceite de automóviles y camiones; reprocesado para reutilización o como combustible
Neumáticos	Neumáticos de automóviles y camiones; material de construcción de carreteras; combustible
Baterías ácidas de plomo	Materias de automóviles y camiones; trituradas para recuperar componentes
Pilas domésticas	Potencial para recuperación de zinc, mercurio y plata

FUENTE: Tchobanoglous, 1994.

4.2 Gas de síntesis

La gasificación de cualquier material orgánico produce un gas llamado “gas de síntesis”, el cual está conformado en su mayoría por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂). El gas de síntesis se obtiene principalmente del proceso de gasificación, y varias de sus propiedades se ven afectadas por cambios en las condiciones de proceso; una de ellas es el poder calorífico (PC), el cual depende de factores como el tipo de gasificador que se emplee, la alimentación y el gas que se ocupe para el reactor (puede ser oxígeno, aire, oxígeno enriquecido, vapor, o combinaciones de todos los anteriores) [Rezaiyan, J., 2005].

En general, en el proceso de gasificación, a elevadas temperaturas incrementa la cantidad de oxígeno necesaria para llevarla a cabo, reduciendo así la eficiencia global del proceso. Además una temperatura de gasificación demasiado alta puede afectar la estructura e integridad físicas del reactor. La Figura 4.8, muestra el comportamiento de formación de los diversos componentes del gas de síntesis en el proceso de gasificación, en función de la temperatura; entre más elevado sea el valor de la temperatura, el gas de síntesis es más rico en CO₂ y H₂. Asimismo se observa que por encima de los 1200°C, prácticamente no se encontrarían fracciones de CO₂ ni H₂O [Rezaiyan, J., 2005].

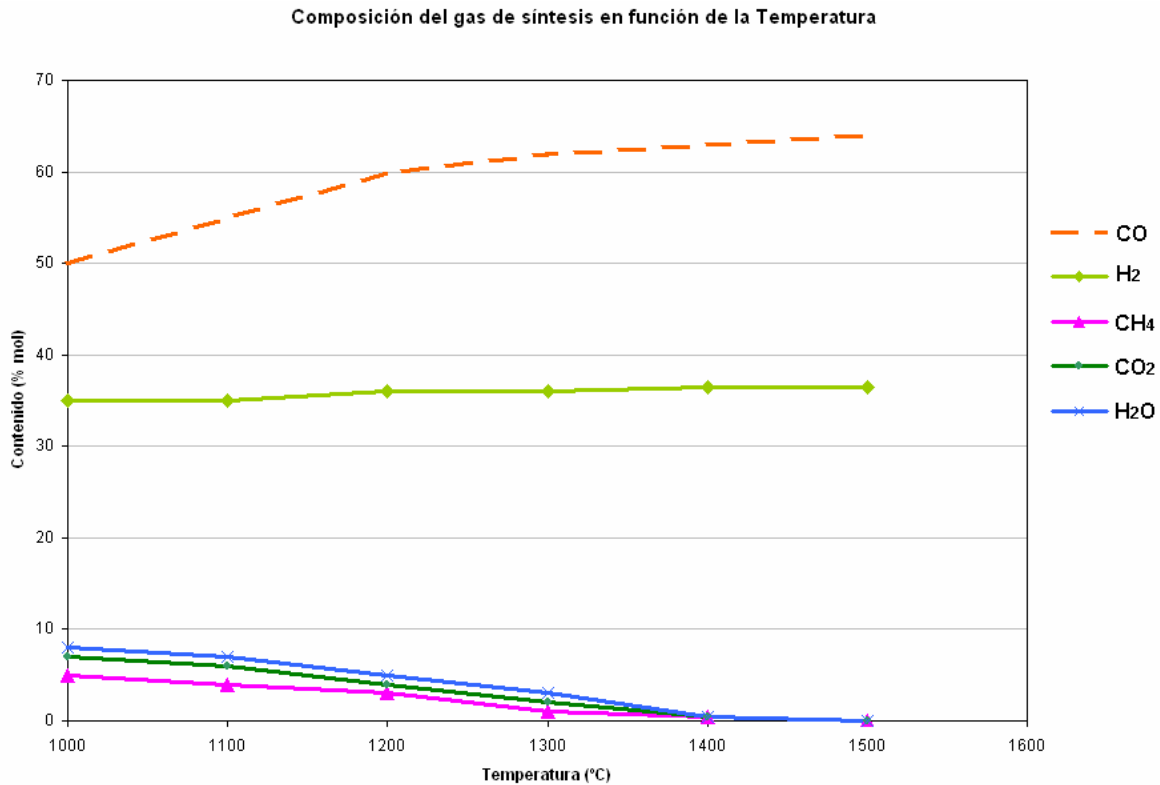


Figura 4.8. Variación de la composición del gas de síntesis con la temperatura a presión constante (29.6 atm).

FUENTE: Higman y van der Burgt, 2003.

Al aumentar la temperatura de gasificación, el gas de síntesis se vuelve rico en CO, mientras que los demás compuestos H₂, CH₄, CO₂ y H₂O disminuyen.

Otro factor que influye directamente en la composición del gas de síntesis es el cambio en la presión del reactor. En general, al aumentar la presión disminuye la cantidad de CO y H₂ en el gas, por el contrario, la cantidad de CO₂, CH₄ y H₂O aumenta al aumentar la presión (Figura 4.9). En otras palabras, la producción de gas de síntesis cae con el aumento de presión, mientras que el poder calorífico aumenta con el aumento de presión (mayor cantidad de metano en el gas).

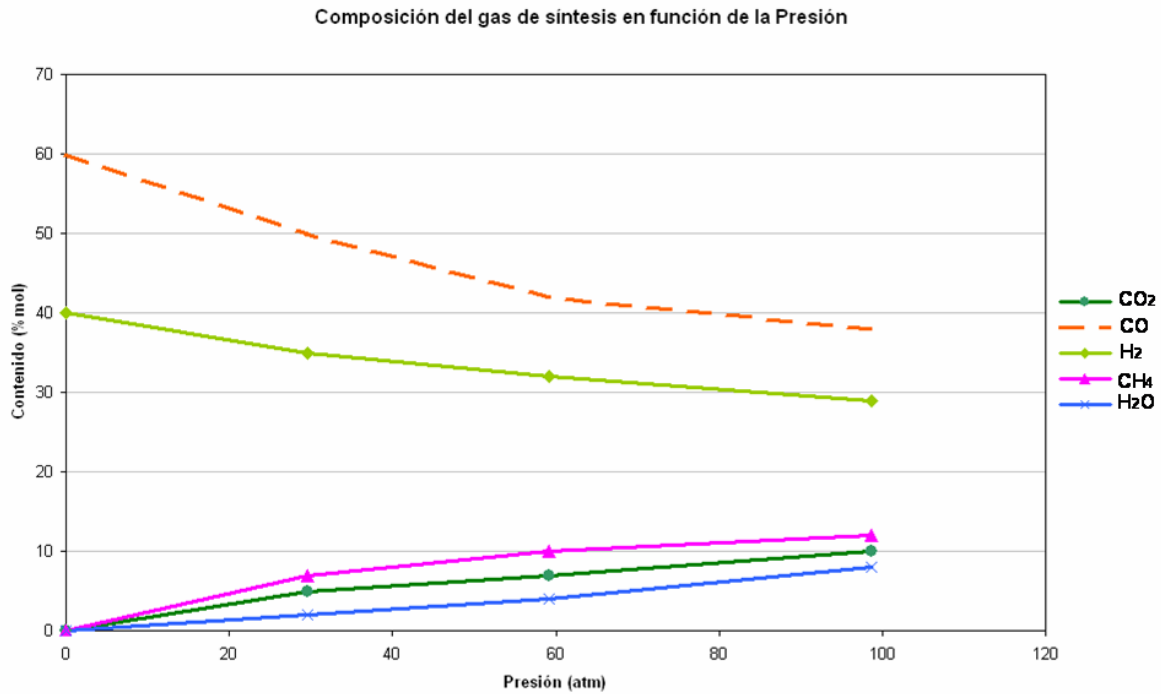


Figura 4.9. Variación de la composición del gas de síntesis con la presión a temperatura constante (1000°C)

FUENTE: Higman y van der Burgt, 2003.

Potencialmente cuando se gasifica a altas presiones el volumen del reactor y por lo tanto el costo requerido para una cierta alimentación disminuye.

De manera muy general, el monóxido de carbono y el hidrógeno tienen una capacidad calorífica de 2.841 kcal/m^3 , aproximadamente $1/3$ del valor del metano (gas natural). Cuando se combina con nitrógeno y agua en el flujo de gas, el gas combustible tiene una capacidad calorífica global de aproximadamente 1.420 kcal/m^3 [Recovered Energy System, 2007].

Tabla 4.13. Poder calorífico reportado para el gas de síntesis de acuerdo a algunas compañías

Compañía	Agente gasificante	Tipo de reactor	Característica	Valor energético del gas (MJ/Nm ³) ¹	Temperatura de flama (°C)
TPS TERMISKA	AIRE	Lecho fluidizado	Compactar carbón	7.2	1723
PROLER	OXÍGENO	Horno rotatorio	Vitrificado	10.6	1775
FERCO	VAPOR	Lecho fluidizado	Combustión de carbón	18.5	1966

¹Nm³: Estas unidades corresponden a un volumen medido a condiciones normales (P_N=1atm, T_N=0°C).

FUENTE: Elaboración propia a partir de revisión bibliográfica.

4.2.1 Composición del gas de síntesis

De acuerdo a varias referencias, la composición del gas de síntesis varía con respecto al tipo de proceso de donde se obtiene y la aplicación destino del mismo. El valor del poder calorífico (PC) que presente el gas de síntesis se ve fuertemente influenciado por el tipo de agente gasificante que se ocupe durante el proceso, a continuación en la Tabla 4.14 y en la Tabla 4.15 se muestran algunos valores reportados para los diferentes escenarios.

Tabla 4.14. Composición del gas obtenido dependiendo del agente gasificante⁹

Agente gasificante	PCS (MJ/m ³)	Composición del gas obtenido (% volumen)						USO
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂	
Aire	<6	16	20	12	2	50	—	Combustible
Oxígeno	10-20	32	48	15	2	3	—	Combustible gas de síntesis
Vapor de agua	10-20	50	20	22	6	—	2	Combustible gas de síntesis
Hidrógeno	>30	—	—	—	—	—	—	Sustituto de gas natural

⁹ <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm#pirolisis>

Tabla 4.15. Composición del gas de síntesis proveniente de la gasificación con biomasa.

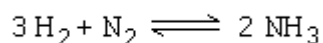
Componente	Contenido (%volumen)
CO	20-25
H ₂	15-20
CH ₄	1-2
CO ₂	10-12
N ₂	48-50

FUENTE: LESME, Jaén. 2000.

4.2.2 Usos del gas de síntesis

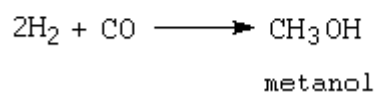
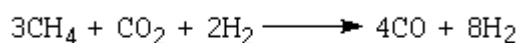
El gas de síntesis, puede ser empleado como materia prima para la síntesis de otros compuestos como alcohol, amoníaco e incluso combustibles líquidos sintéticos. También puede ser utilizado como combustible en los procesos de generación de energía eléctrica [Llamas, et al. 2005].

Otras de las aplicaciones del gas de síntesis es la preparación de amoníaco (NH₃), mediante el proceso de Haber:

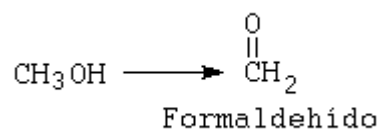


El amoníaco y sus sales inorgánicas son los fertilizantes nitrogenados de mayor importancia y, a partir del amoníaco se pueden obtener otros productos como la urea y la melamina. La urea reacciona con el formaldehído produciendo resinas duroplásticas de melamina-formaldehído; esta resina se emplea para la capa superior de laminados como la "fórmica" y en recubrimientos industriales. Tanto la resina de urea como la de melamina-formaldehído, se emplean en diversos tratamientos textiles, de papel, adhesivos y polvos para moldeado. Asimismo, el amoníaco se puede oxidar a ácido nítrico (HNO₃), que es empleado para obtener diversos compuestos nitrogenados; también interviene en reacciones para obtener aminas y es empleado en ocasiones como disolvente.

Después de la producción de amoníaco, la segunda aplicación relevante del gas de síntesis es la obtención del metanol, la cual se lleva a cabo en dos etapas:



El metanol es empleado fundamentalmente para la obtención del formaldehído, por medio de la siguiente reacción:



El formaldehído se utiliza generalmente para la obtención de resinas diversas como por ejemplo de fenol-formaldehído, de urea-formaldehído, de melamina-formaldehído y resinas poliacetálicas.

El gas de síntesis es empleado en diversos procesos como materia prima (combustible), permitiendo la obtención de otros productos de valor comercial. En la Figura 4.10, se muestra una cadena de aplicaciones industriales para el gas de síntesis.

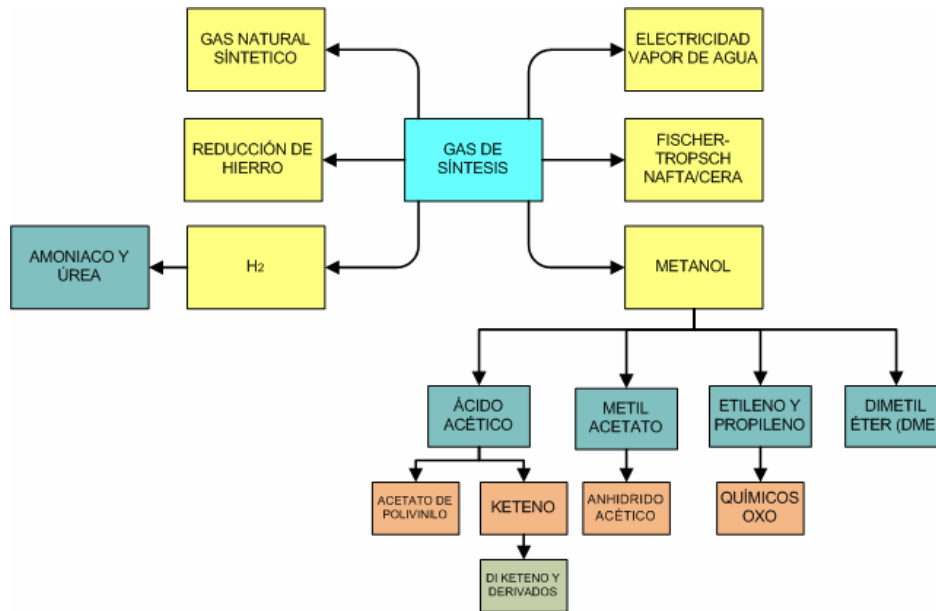


Figura 4.10. Usos del gas de síntesis como materia prima
 FUENTE: Elaboración propia.

4.3 Importancia de la reducción de emisiones atmosféricas en los procesos térmicos

Para la producción del gas de síntesis, se emplean diversos procesos, en los cuales uno de los retos ambientales es la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera. En la legislación en materia ambiental, se han elaborado diversas normas que exigen la reducción de las emisiones a la atmósfera por diversos factores, entre los que destacan los daños a los seres vivos y la afección a la capa de ozono.

Debido a la relevancia de este punto, resulta conveniente conocer las emisiones que se pueden generar en procesos que se relacionan con la producción del gas de síntesis.

La Agencia para la Protección ambiental (EPA por sus siglas en inglés), realizó un estudio donde se recopilaron datos científicos sobre las relaciones entre diversas concentraciones de contaminantes atmosféricos y sus efectos adversos para los humanos y el medio ambiente. A partir del análisis de datos, se elaboró una lista de *criterios de contaminación* y de niveles ambientales aceptables, conocidos

como Normas sobre la Calidad del Aire Ambiental. Los contaminantes estudiados incluyen: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono, materia aspirable en partículas y plomo. Además de estos contaminantes la Agencia se ha dado a la tarea de estudiar otros tantos (conocidos como *contaminantes no-clasificados*); sin embargo no se han establecido las Normas correspondientes.

A continuación se dará una breve descripción de las características y efectos de los indicadores principales de contaminación atmosférica [Tchobanoglous, 1994]:

a) Óxidos de Nitrógeno (NO_x): Los óxidos de nitrógeno más importantes son el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂); que en su conjunto se conocen como NO_x. El NO_x térmico se forma mediante reacciones entre el oxígeno y el nitrógeno orgánico en el combustible. Los óxidos de nitrógeno son precursores de la formación de ozono (O₃) y peroxi-aceto-nitrilo (PAN), oxidantes fotoquímicos conocidos como *smog*. También contribuyen a la formación de lluvia ácida y aerosoles nítricos (gotas líquidas) que pueden causar niebla.

b) Dióxido de Azufre (SO₂): El dióxido de azufre se forma mediante la combustión de compuestos que contienen azufre. Es un gas irritante para los ojos, nariz y garganta. En altas concentraciones puede causar enfermedades o la muerte en personas afectadas por problemas pulmonares (asma o bronquitis). El SO₂ se relaciona con la producción de lluvia y nieve ácidas, afectando ríos, lagos y bosques.

c) Monóxido de carbono (CO): Se forma mediante la combustión de materiales carbonosos en ausencia de oxígeno; reacciona en el torrente sanguíneo con la hemoglobina, formando oxihemoglobina (HbO₂), que transfiere oxígeno a los tejidos vivos a través del cuerpo. La falta de oxígeno puede causar dolores de cabeza, náuseas e incluso la muerte en concentraciones muy elevadas.

d) Materia particulada (MP): Esta materia se forma durante la combustión, incluyendo la combustión incompleta del material y arrastre físico de los materiales no combustibles. Las emisiones de partículas causan reducciones en la visibilidad y efectos diversos sobre la salud. Las partículas más pequeñas (10 μm) son críticas porque pueden ingresar a los pulmones.

e) Dioxinas y Furanos: Una dioxina es un miembro de la familia de los compuestos orgánicos conocidos como policlorodibenzodioxina (PCDD). Una molécula de la familia PCDD está formada por una estructura de triple anillo en la que dos anillos del benceno están interconectados por un par de átomos de oxígeno. La familia policlorodibenzofurano (PCDF) tiene una estructura similar, excepto que solamente un átomo de oxígeno une los dos anillos del benceno. Existen un total de 75 isómeros posibles de PCDD y 135 isómeros de PCDF. La importancia de estas familias de compuestos orgánicos, radica en que algunos de sus isómeros se encuentran entre las sustancias más tóxicas que existen. Existe evidencia de que los PCDD y los PCDF tienen propiedades cancerígenas en animales [Czuczwa, 1984] y recientemente se ha cuestionado su efecto adverso en los humanos, sin embargo, todavía no se ha determinado el mecanismo exacto de la formación de PCDD y PCDF en el procesamiento térmico de los residuos sólidos.

En la legislación de nuestro país existen normas en las cuales se menciona el límite máximo permisible de emisiones tóxicas al ambiente. Ejemplo de ello se encuentra en la NOM-098-SEMARNAT-2002, de donde se obtuvo la siguiente información:

Tabla 4.16. Límites máximos permisibles para instalaciones de incineración de residuos

Contaminante	Límite de emisión	Frecuencia de medición	Norma que aplica o método
CO (mg/m ³)	63	Continuo	Infrarrojo no dispersivo y celda electroquímica
HCl (mg/m ³)	15	Trimestral	NMX-AA-070-1980
NO _x (mg/m ³)	300	Semestral	Quimiluminiscencia
SO ₂ (mg/m ³)	80	Semestral	NMX-AA-55-1979
Cadmio (mg/m ³)	0.07	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Mercurio (mg/m ³)	0.07	Semestral	Espectrometría de absorción atómica con vapor frío
Dioxinas y Furanos EQT ¹ instalaciones de incineración nuevas (ng/m ³)	0.2	Anual	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución
Dioxinas y Furanos EQT instalaciones de incineración existentes (ng/m ³)	0.5	Anual	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución

¹ EQT: Equivalencia tóxica

FUENTE: NOM-098-SEMARNAT-2002

4.4 Pretratamiento de los RSU

Existen en la actualidad una serie de operaciones básicas para la separación y el procesamiento de materiales residuales; las operaciones básicas principalmente utilizadas en la recuperación y el procesamiento de los RSU se resumen en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17. Métodos utilizados para el procesamiento y recuperación de componentes individuales de los RSU

Alternativas de procesamiento	Descripción Operación Unitaria
Reducción de tamaño	Proceso unitario utilizado para la reducción de los RSU no seleccionados y de los materiales recuperados. Las aplicaciones típicas incluyen: 1) molinos de martillos para la trituración de los RSU, 2) trituradores cortantes, para RSU no seleccionados y materiales reciclados, tales como aluminio, neumáticos y plásticos, y 3) cubas trituradoras, utilizadas para procesar residuos de jardín.
Separación por tamaño	Proceso unitario por el que se separan los materiales según sus características de forma y tamaño, normalmente mediante el uso de cribas. Frecuentemente se usan varios tipos de cribas, incluyendo: 1) cribas vibratorias, para la selección de tamaño de residuos de jardín triturados; 2) trómeles, utilizados para separar RSU no seleccionados antes de su trituración, y 3) cribas de discos, utilizadas para separar el vidrio de los RSU triturados.
Separación por densidad	Procesos unitarios por los cuales se separan los materiales según su densidad. Las aplicaciones típicas incluyen: 1) clasificadores neumáticos, para la preparación de combustible derivado de residuos (CDR); 2) separación por inercia, para procesamiento de RSU no seleccionados, y 3) flotación, para el procesamiento de escombros de construcción.
Separación por campo eléctrico y magnético	Procesos unitarios en los que los materiales se separan según su carga electrostática y su permeabilidad magnética. Las aplicaciones típicas incluyen: 1) la separación de plásticos y papel, y 2) la separación de materiales férricos y no férricos (por ejemplo, los botes de hojalata y botes de aluminio).
Densificación (compactación)	La densificación o compactación son procesos unitarios utilizados para incrementar la densidad de los materiales recuperados con el fin de reducir los costes de transporte y de simplificar el almacenamiento. Las aplicaciones típicas incluyen: 1) la utilización del embalaje para cartón, papel, plásticos y latas de aluminio, y 2) el uso de la pelitización ¹ para la producción de CDR densificado.
Manipulación de materiales	Procesos unitarios empleados para el transporte y el almacenamiento de los RSU y materiales recuperados. Las aplicaciones típicas incluyen: 1) transportadores para el traslado de RSU y materiales recuperados; 2) contenedores de almacenamiento para los materiales recuperados, y 3) equipamiento, como elevadoras, palas frontales y varios tipos de camiones para el transporte de RSU y materiales recuperados.

¹Pelitización: proceso mediante el cual se elaboran trozos homogéneos de algún residuo sólido (biomasa, RSU, pastas, por dar algunos ejemplos).

FUENTE: Tchobanoglous, 1994.

El pretratamiento que se le puede dar a los RSU varía de acuerdo a la tecnología disponible, al tipo de residuos con los que se cuente, a la cantidad de los mismos, entre otros factores. Sin embargo, para poder obtener el mayor beneficio de los RSU, es necesario contar con algún tipo de pretratamiento que permita eficientar, en la medida de lo posible, el proceso propuesto.

Sin embargo, son casos específicos, ya que un pretratamiento a final de cuentas, busca obtener el mayor beneficio de los productos que se pueden reciclar y, como se observa en la Tabla 4.17, existen diversos métodos para la recuperación de diversos componentes de los RSU. Actualmente en todo el mundo existen diversas plantas que se dedican al tratamiento de los RSU y en cada una de ellas se pueden encontrar distintos pretratamientos para los residuos. Como ejemplo en la Figura 4.11 se presenta un diagrama de bloques donde se aprecia el pretratamiento de los residuos que ingresan al Complejo Medioambiental conocido como Valdemingómez en España. En la Figura 4.12 se muestra un esquema muy similar de pretratamiento para los RSU.

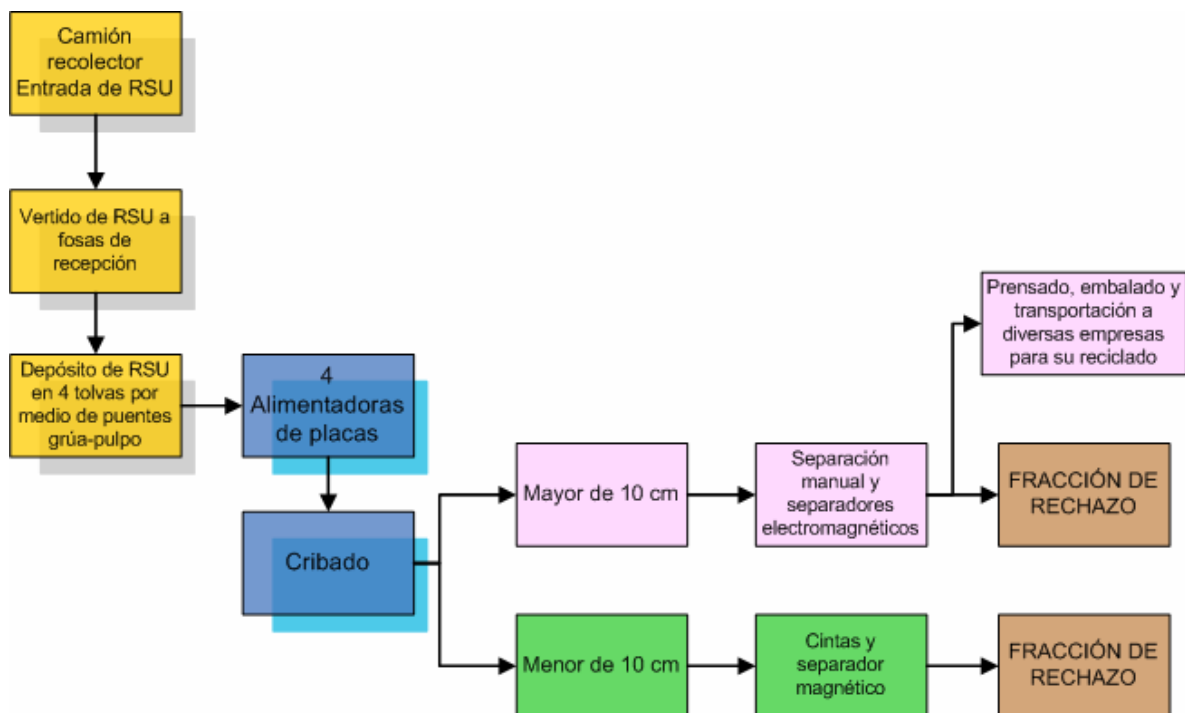


Figura 4.11. Pretratamiento de RSU, Valdemingómez-Madrid.

FUENTE: Elaboración propia a partir de folleto informativo.

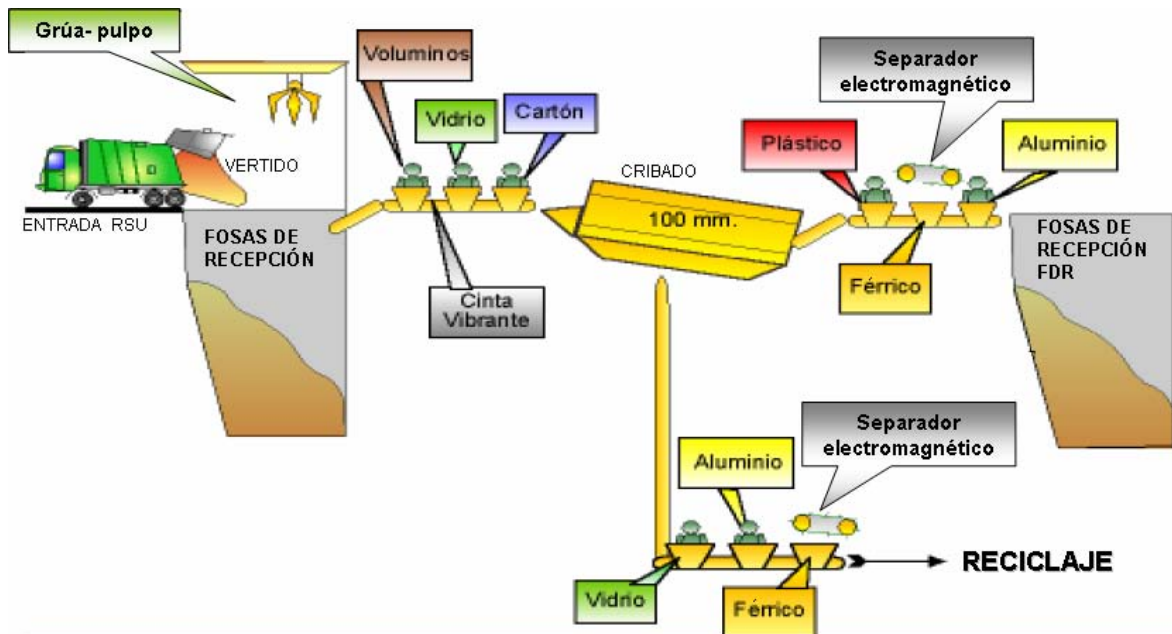


Figura 4.12. Pretratamiento de RSU, secuencia de pasos

FUENTE: Modificado de Gil, 2006.

En esta planta se tratan 1200 ton/día de RSU, es decir, 438000 ton/año de RSU. El pretratamiento mostrado se describe puntualmente a continuación:

- 1) *Recepción de RSU:* el proceso inicia con la llegada de los camiones recolectores, los cuales se pesan previo vertido de su contenido.
- 2) *Vertido de RSU a fosas de recepción:* el contenido de los camiones se vierte en los pozos de recepción, en los cuales se encuentra todos los residuos que colectaron en su recorrido de recolección.
- 3) *Depósito de RSU en tolvas:* una vez depositados los residuos en los pozos de recepción, se trasladan por medio de puentes grúa-pulpo, a 4 tolvas de recepción, en cuyo fondo están situados 4 alimentadoras de placas.
- 4) *Alimentadoras de placas:* se encargan de dosificar un caudal constante a las líneas de tratamiento (alimentadores vibratorios). En estas líneas los operarios retiran vidrio, objetos voluminosos y grandes embalajes de cartón.
- 5) *Cribado:* se lleva a cabo en 4 cribas giratorias donde se separan los residuos en dos fracciones, mayor y menor de 10 cm.

- 6) *Fracción Menor de 10cm*: se vierte en unas cintas para poder realizar una separación manual.
- 7) *Cintas y separador magnético*: Se separan manualmente las botellas pequeñas de vidrio y envases pequeños de aluminio, así como botes y latas, por medio de un separador magnético.
- 8) *Fracción de rechazo*: la fracción de rechazo está conformada principalmente por materia orgánica.
- 9) *Fracción Mayor a 10cm*: esta fracción pasa a unas cintas transportadoras para realizar una separación posterior.
- 10) *Separación manual y electromagnética*: en esta etapa se separan manualmente los productos susceptibles de recuperación, como el plástico y envases de aluminio y, además, mediante separadores electromagnéticos se recuperan todos los materiales férricos.
- 11) *Prensado y embalado*: todos los productos obtenidos son adecuadamente prensados, embalados o empaquetados y transportados a diversas empresas que los reciclarán.
- 12) *Fracción de rechazo*: de igual forma que en la Fracción menor a 10cm, en esta etapa, se obtiene una fracción de rechazo que no contiene ningún material aprovechable y constituye aproximadamente un 42% de los RSU que entraron a la planta. [Información obtenida de folleto y CD informativos sobre la empresa].

En esta planta, la Fracción de Rechazo (FDR) se emplea como material combustible de alto poder calorífico por medio de una unidad de recuperación energética, donde se obtiene una perfecta combustión del rechazo, considerando el poder calorífico.

La compañía Waste to Energy¹⁰, con sede en Sudbury, Inglaterra, al igual que la compañía angloamericana Kwikpower Internacional, parten de pellets provenientes de diversos residuos orgánicos, es decir, los emplean como

¹⁰ Información consultada en la página <http://www.wastetoenergy.co.uk/>

combustible en el proceso de gasificación, para generar energía, calentar agua o simplemente para obtener otro tipo de combustibles. Los pellets pueden provenir de distintas fuentes como los RSU, residuos de clínicas u hospitales, residuos de aceite de palma, lodo de aguas residuales, cáscaras de arroz, cáscaras o mazorcas de maíz, residuos de madera, residuos de la industria de cuero, neumáticos, por dar algunos ejemplos.

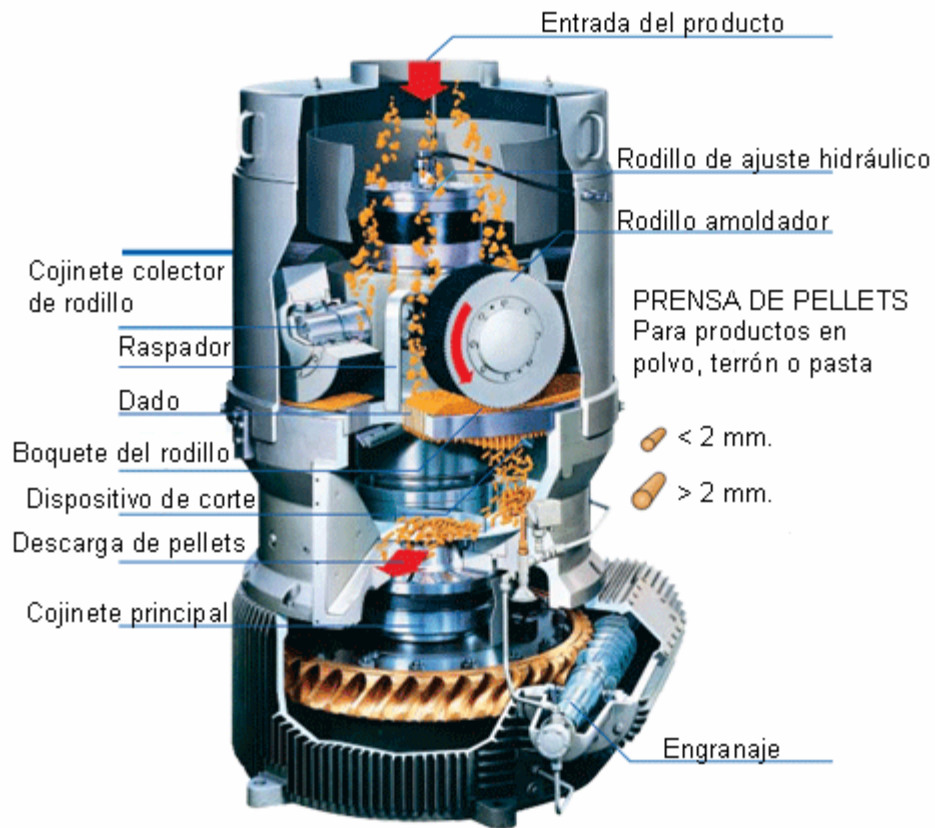


Figura 4.13. Tecnología empleada para hacer pellets.

FUENTE: Kahl Pellet Mills.LCI Corporation.

Para poder generar los pellets, se le da a la fracción de rechazo (proveniente de los RSU) un tratamiento posterior, en ocasiones se somete a un proceso de secado, para posteriormente poder generar los pellets. Una consideración relevante, es que los pellets pueden no ser homogéneos con respecto al valor del poder calorífico, ya que, como se ha visto, el poder calorífico de los RSU varía de acuerdo al lugar de recolección. Los pellets resultantes de este proceso, se pueden emplear en procesos posteriores como combustible, y la forma y tamaño

varía de acuerdo al proceso al que se someta dicha fracción; un ejemplo se muestra en la Figura 4.14:



Figura 4.14. “Pellets” de RSU

4.5 Tratamiento de los RSU

En la actualidad existen tres diferentes métodos de tratamiento de los RSU, que son: tratamientos físicos, tratamientos térmicos y tratamientos biológico/químicos.

De manera general, las tecnologías físicas presentan etapas de separación o secado previo de los RSU, el material resultante se emplea como combustible de residuo e incluso se puede llegar a transformar en pellets. De manera general, este tipo de tratamientos se puede considerar como un preacondicionamiento o pretratamiento de los RSU para poder ser alimentados en procesos como la conversión térmica.

En la aplicación de tratamientos térmicos, generalmente los RSU se tratan con temperaturas que oscilan entre los 371° C y los 537° C (dependiendo del proceso); se presentan altas velocidades de reacción y el gas producto se emplea para generar electricidad. Durante este tratamiento se presenta una conversión térmica de la cual se pueden obtener subproductos tales como químicos, combustibles e incluso gasolinas. Existe también otro tratamiento similar concebido como reciclaje térmico avanzado, el cual se vale de carbón orgánico y se lleva a cabo en ambientes ricos en oxígeno con temperaturas entre los 704°C y los 1371°C; produce un gas rico en bióxido de carbono y agua con algunos subproductos

como cenizas de fondo y cenizas volátiles, que son separadas y recicladas ya que permiten la recuperación de metales. Los gases producidos pueden ser sometidos a un proceso de enfriamiento para obtener otro tipo de subproductos como yeso y ácido clorhídrico.

Las tecnologías biológicas/químicas se llevan a cabo generalmente a bajas temperaturas y presentan bajas velocidades de reacción. Un aspecto favorable de este tipo de tratamiento, es que aceptan en la alimentación elevados niveles de humedad; dentro de esta tecnología se pueden encontrar la síntesis de productos en la cual se emplean procesos químicos en varias etapas y finalmente, los subproductos son variados y pueden ser desde abonos y químicos, hasta electricidad. Ejemplos de este tipo de tecnología son la fermentación aerobia o compostaje y la fermentación anaerobia o biometanización, este tipo de procesos depende de la presencia o ausencia de oxígeno bajo la cual se lleve a cabo el proceso. El objetivo principal de los tratamientos biológicos consiste en la transformación de la materia orgánica de los residuos en un producto final estable [Cortés, S., 2006].

Tomando como referencia los tres tratamientos mencionados, un sistema típico de tratamiento de RSU presenta tres etapas: la primera etapa consiste en un pre-procesado, con la finalidad de remover materiales reciclables (vidrio, metales, papel) y prepara los RSU para una alimentación posterior en alguna unidad de conversión, que es la que finalmente marca la pauta para la calidad del pretratamiento. La segunda etapa es la unidad de conversión en la que, partiendo de cierta alimentación de RSU, se generan diversos subproductos que pueden o no tener un valor comercial, incluso pueden ser destinados a una disposición en un relleno sanitario, siempre y cuando no se trate de residuos peligrosos. La tercera etapa consiste en un tratamiento posterior, en los casos que así se requiera, para obtener otro tipo de productos, tales como el biogás o gasolinas sintéticas; esto varía dependiendo de la conformación de cada sistema de tratamiento.

5. DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS TÉRMICAS PARA LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS

Una de las opciones a las que se había recurrido constantemente con anterioridad, era la incineración; sin embargo se relacionó con diversos problemas como emisiones contaminantes tanto al aire como a otros medios, elevados costos económicos y laborales, insustentabilidad, pérdida de energía, incompatibilidad con otros sistemas de manejo de residuos. En todo el mundo los incineradores son la fuente principal de emisiones de dioxinas, mercurio, hidrocarburos halogenados, gases ácidos y gases de efecto invernadero.

Por su parte, los rellenos sanitarios tampoco resultan una alternativa viable ya que no son sustentables y resultan ambientalmente problemáticos, generando lixiviados, gases de efecto invernadero, quemas en los rellenos, proliferación de fauna nociva, olores desagradables, derroches de tierras y materiales, por mencionar algunas desventajas. Se ve entonces que tanto los incineradores como los rellenos sanitarios generan subproductos tóxicos y una corriente de residuos adicional, la cual debe ser posteriormente tratada [Tangri, 2005].



Figura 5.1. Laguna de lixiviados de un Relleno Sanitario

Por lo anterior, se infiere que el uso de estas dos alternativas no es factible, primero porque no cumple con los niveles de emisión de contaminantes que exigen las autoridades y en segundo término, porque en vez de eliminar un

problema, generan otros de manera paralela. En la actualidad se requieren tecnologías más amigables al ambiente y que se apeguen a las normas internacionales, por lo que se recurre a procesos prácticamente nuevos que cumplen con estas características. Es por ello que se ha recurrido al uso de tecnologías para el tratamiento térmico de RSU, de las cuales las que se han empleado de manera más frecuente a nivel industrial, son: la pirólisis, la gasificación y la gasificación avanzada ó gasificación con plasma térmico.

5.1 Pirólisis

La pirólisis es el proceso térmico de residuos, en ausencia total de oxígeno; se presenta en un rango de temperaturas de los 300°C a los 900°C [Elías, 2002]. Estos sistemas se emplean para conversión de residuos sólidos en combustibles gaseosos, líquidos o sólidos. La pirólisis utiliza una fuente de combustible externa para conducir las reacciones endotérmicas en un ambiente libre de oxígeno. Durante este proceso se genera: una mezcla de gases hidrocarbonados y algo de monóxido de carbono (CO), una mezcla de hidrocarburos líquidos y un sólido carbonoso que presenta incrustaciones de elementos inertes que no pirolizan como piedras, vidrio y metales [Gestión de Tratamiento de los Residuos Urbanos¹¹].

En los últimos tiempos se han desarrollado una serie de tecnologías basadas en la pirólisis. La de la Figura 5.2 representa una variante de la pirólisis, que toma el nombre comercial de termólisis. Respecto al proceso, la temperatura de operación no sobrepasa los 500°C. El esquema reproduce una planta de tratamiento de FDR (Fracción De Rechazo, ver sección 4.4), en la que se pretende cerrar el ciclo de tratamiento.

¹¹ <http://www.uned.es/biblioteca/rsu/pagina4.htm>, 2007.

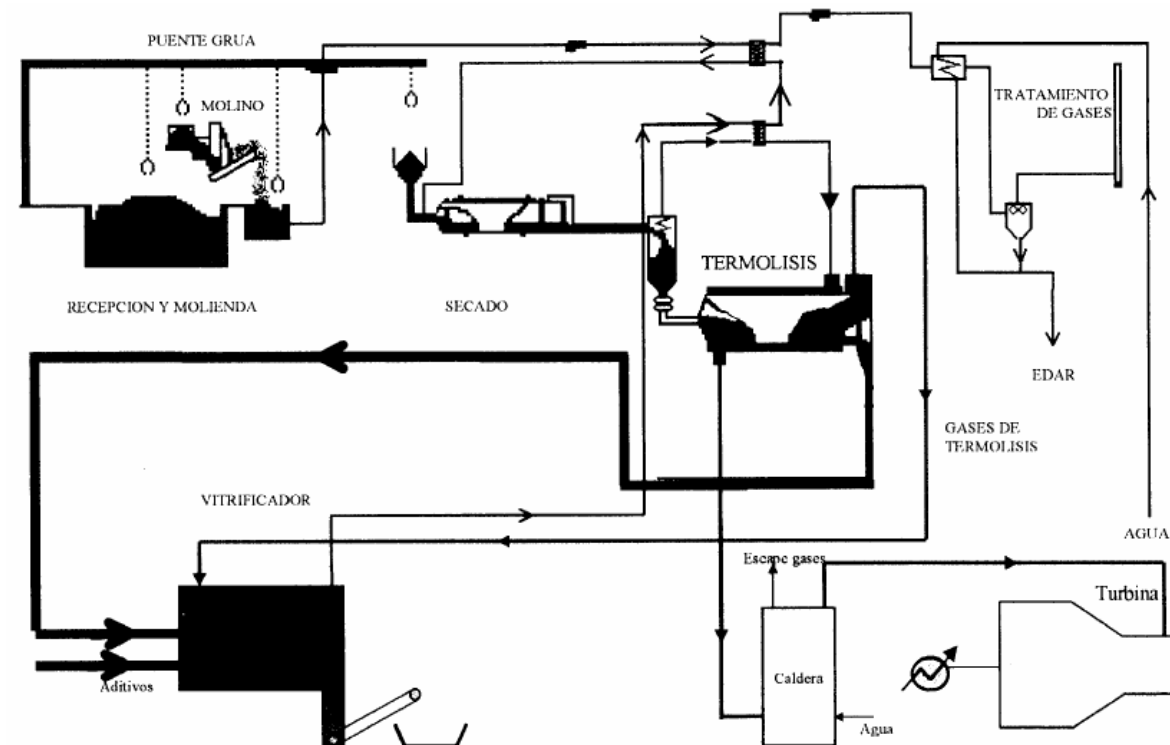


Figura 5.2. Planta de tratamiento de RSU por medio de pirólisis (termólisis)

FUENTE: Elías, 2002.

Los gases calientes del termolizador se queman en una caldera en la que se genera vapor y electricidad. La fracción inorgánica del residuo se vitrifica usando como combustible el residuo carbonoso (char) y la fracción líquida, o condensada, de los aceites pirolíticos. Por debajo de los 500°C la cinética es controlada para las partículas de tamaño <1cm. A mayor temperatura las reacciones son más rápidas.

Desde el punto de vista operativo, el hecho de trabajar en ausencia de oxígeno es un peligro debido al riesgo de explosión. Durante el proceso de pirólisis (degradación térmica en ausencia de aire), el residuo se descompone en productos sólidos: carbón, alquitrán, líquidos, aceites y gases; distribución que varía en función de la temperatura [Elías, 2002].

En la actualidad, esta tecnología se utiliza para la producción de carbón vegetal a partir de madera, de coque y gas de coquización a partir de carbón, y de gas de

combustible y betún a partir de fracciones pesadas de petróleo. Para el caso del tratamiento de RSU por medio de esta tecnología, prácticamente no hay aplicaciones a gran escala, por lo que no se cuenta con referencias al respecto. Está legalmente clasificada junto con la incineración en la Unión Europea y Estados Unidos [Tangri, 2005].

Entre las desventajas de la pirólisis destacan: los altos costos de operación, si los residuos están húmedos, se requiere una gran cantidad de calor para secarlos antes de someterlos a la pirólisis (sensible a la humedad), además requiere personal calificado para la operación del proceso. También se presenta la desventaja de que requiere una fuente externa de calor, ya que se trata de un proceso endotérmico [SEGOB, 2007].

5.2 Gasificación

La gasificación fue descubierta aproximadamente en el siglo XIX; es un proceso térmico que permite la conversión de un combustible sólido, como la biomasa, en un combustible gaseoso, mediante un proceso de oxidación parcial. Recientemente se ha estudiado su aplicación para la combustión de diferentes residuos sólidos. El gas resultante de este proceso, contiene aproximadamente 30% de monóxido de carbono (CO), 12% de dióxido de carbono (CO₂), 18% de hidrógeno (H₂) y el resto de su composición es una mezcla de alquitrán, agua y pequeñas porciones de hidrocarburos tales como el metano (ver sección 4.2.1). El gas posee un poder calorífico bajo, entre los 4 a los 7 MJ/m³. Sin embargo, si se emplea oxígeno (O₂) como agente oxidante, su poder calorífico puede oscilar entre los 10 a los 18 MJ/m³.

Existen diferentes tipos de gasificación, la más común es aquella que emplea aire como agente oxidante, debido a cuestiones económicas y tecnológicas. El intervalo de temperaturas de la gasificación oscila entre los 800 °C a los 1800 °C;

la temperatura que se alcance depende en gran medida de las características de la alimentación. En la Figura 5.3 se puede observar un esquema de proceso de gasificación para tratamiento de biomasa por medio de un gasificador de lecho fluidizado.

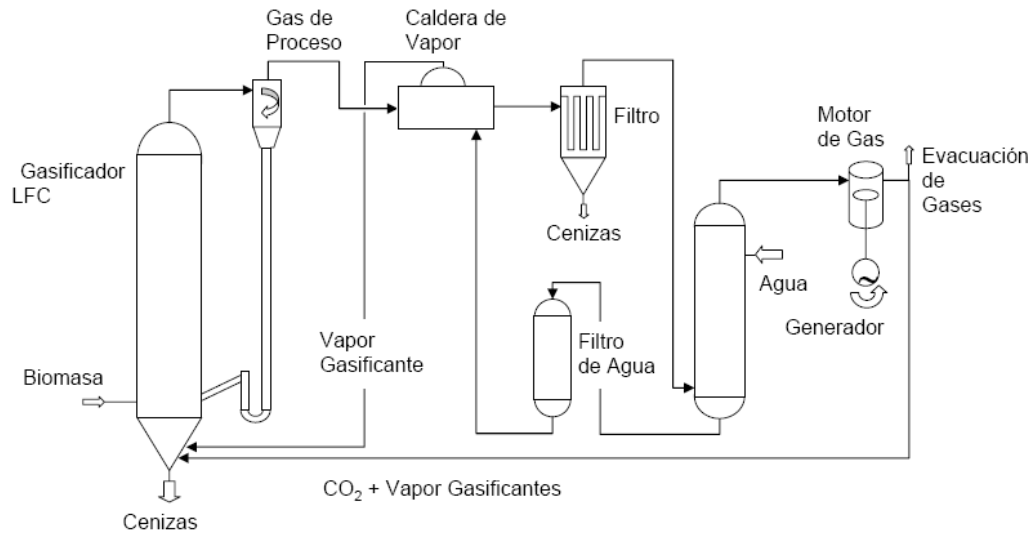


Figura 5.3. Proceso de gasificación

FUENTE: Cabanillas, 2007.

En general la técnica de gasificación es altamente eficaz para la reducción del volumen de residuos sólidos y recuperación energía. A grandes rasgos, el proceso implica la combustión parcial de un combustible carbonoso para generar un combustible rico en gas con altos contenidos de monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂) y algunos hidrocarburos saturados, principalmente metano (CH₄). El gas combustible puede quemarse en un motor de combustión interna, turbina de gas o caldera, bajo condiciones de oxígeno adicional. Debido al equilibrio agua-gas que se presenta en los gasificadores, se puede calcular de manera teórica la composición del gas procedente de un gasificador que ha alcanzado el equilibrio a determinada temperatura.

La versatilidad de este proceso permite que se puedan emplear diferentes combustibles como carbón, coque de petróleo, basura seleccionada y biomasa (carbón vegetal, madera y residuos de madera), y múltiples residuos agrícolas

(estopas de coco, pajas de cereales, cáscaras de arroz, por dar algunos ejemplos); cabe señalar que en la actualidad existen algunas fábricas de bioetanol estadounidenses que emplean como combustible estiércol de vaca [Martínez, 2007]. Es claro que estos combustibles difieren mucho en cuanto a sus propiedades físicas, químicas y morfológicas, por lo que existen exigencias distintas en cuanto al método de gasificación que se debe emplear y, en consecuencia, se requieren diferentes diseños de reactor e incluso distintas tecnologías de gasificación. Por lo descrito, se deduce que no existe un gasificador universal como tal, capaz de manejar la totalidad o la mayoría de los combustibles. Los diseños de los gasificadores se pueden basar en gasificadores a contracorriente, concurrente, flujo cruzado, lecho fijo, lecho fluidizado y flujo por arrastre (se describen brevemente en la Tabla 5.2). En todos los casos se presentan tanto ventajas como desventajas respecto al tipo de combustible, aplicación y sencillez de funcionamiento.

En cada caso, hay que considerar las propiedades de cada uno de los combustibles que se van a emplear, ya que de ellos dependerá la calidad del producto y la eficiencia del proceso. Dichas características son: contenido energético, contenido de humedad, materias volátiles, tamaño de partículas y distribución por tamaño, contenido de cenizas y composición química de éstas, reactividad y densidad aparente; ya que cada uno de estos parámetros intervendrá directamente en el proceso.

Las principales reacciones que se presentan durante la gasificación, que involucran fundamentalmente al carbono, hidrógeno y al oxígeno, se muestran en la Tabla 5.1. Las reacciones 1 a 6 involucran oxígeno libre y las reacciones 7 a 14 oxígeno combinado generalmente con vapor de agua.

Tabla 5.1. Reacciones clásicas de gasificación y combustión

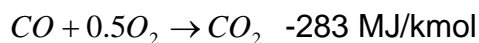
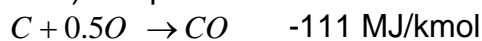
Reacciones químicas	Variación de la entalpía ¹ $\Delta H \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$
Con oxígeno libre	
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	414602
$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	241700
$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$	282940
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	802954
$C + 0.5O \rightarrow CO$	110732
$CH_4 + 0.5O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	36615
Con oxígeno combinado	
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	41240
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	172208
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	74117
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	172827
$C + H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$	89727
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	205085
$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO + 4H_2$	163844
$CH_4 + 2CO_2 \rightarrow CO + 2H_2$	246325

¹Datos de entalpía para agua en fase vapor.

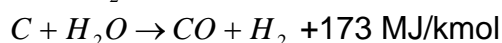
FUENTE: Meunier, J. (1958)

Estas reacciones varían en función del combustible que se emplee para el proceso, ya que reaccionará con oxígeno, agua e hidrógeno, por señalar algunos. De las reacciones mostradas en la Tabla 5.1, se pueden considerar las siguientes como las más representativas del proceso:

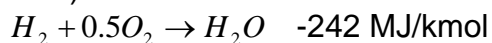
a) Etapa de combustión: reacciones exotérmicas



b) Reacciones de gasificación: reacciones endotérmicas



c) Otras reacciones: reacciones exotérmicas



Las reacciones exotérmicas liberan calor cuando se llevan a cabo, lo que propicia la formación de las reacciones endotérmicas, que son aquellas que requieren del calor del medio para efectuarse.

En general la gasificación consiste en la conversión de sustancias orgánicas en combustible gaseoso o gas de síntesis por medio de una oxidación parcial, mayoritariamente con oxígeno puro a temperaturas superiores a los 200° C.

De acuerdo a la Organización Latinoamericana de Energía [OLADE, 1987], los procesos y equipos de gasificación pueden clasificarse de acuerdo a:

- Fuente de energía para el proceso (Alotérmico, Autotérmico)
- Presión de operación en el gasificador (Baja Presión, Alta Presión)
- Movimiento relativo de los gases y el combustible (Flujo concurrente, Flujo a contracorriente, Flujo cruzado)
- Régimen de flujo en el gasificador (Lecho fijo, Lecho fluidizado, Flujo por arrastre)
- Forma de cargar el combustible y descargar cenizas (Intermitentes, Continuo o semicontinuo)
- Clase de comburente (Oxígeno, Aire, Oxígeno/vapor, Aire/vapor)

En la Tabla 5.2 se presentan algunas características de los gasificadores de acuerdo al movimiento relativo de los gases y el combustible, y de acuerdo al régimen de flujo del gasificador.

Tabla 5.2. Tipos de gasificadores y sus características

	Contracorriente	Concurrente	Flujo Cruzado	Lecho fijo	Lecho fluidizado	Flujo por arrastre
Temperatura del reactor (°C)	900-1200	650	2000	1200	800-1100	1200
Tamaño de partícula requerido (mm)	20-100	NR ¹	5-10	3-50	<8	>0.1
Gas añadido	Vapor	NR	Aire	Aire/vapor	Oxidante o aire	NR
Temperatura de salida del gas de síntesis (°C)	500-650	400-500	NR	NR	NR	NR
Especificaciones particulares	El gas obtenido tiene un PCI=6300kJ/Nm ³ , contiene volátiles, ácidos y alquitranes. Presenta tres zonas: pirólisis, reducción y oxidación.	El gas de síntesis contiene alquitranes y algunas fracciones orgánicas. En la zona de reducción se alcanzan temperaturas de 650° C.	Requiere combustible con bajo contenido de alquitrán. Bajo tiempo de contacto entre el aire y el combustible. Rápido arranque.	Puede tratar RSU, requiere menor tratamiento del combustible.	Hay una temperatura moderada y uniforme en todo el proceso. Poca formación de alquitrán.	Contiene una cámara de gasificación presurizada.

¹NR: No Reportado

FUENTE: Elaboración propia a partir de OLADE, 1987.

Existen ciertas variables de operación que afectan directamente el comportamiento de los gasificadores; algunas de ellas son:

a) *Temperatura:* en la zona de reacción (reactor) afecta directamente a las constantes de equilibrio de las reacciones que se llevan a cabo. Las elevadas temperaturas favorecen a las reacciones endotérmicas; lo que posibilita la formación de un gas de mejor calidad, es decir, con mayor porcentaje de CO, H₂ y CH₄. Sin embargo, pueden provocar la fusión de cenizas formando escoria, solidificando sílice sobre la parrilla, causando la obstrucción parcial, originando la salida de funcionamiento del gasificador. El intervalo de temperaturas que se encuentra en este tipo de procesos, oscila entre los 1000° C y los 1200° C; por debajo de este intervalo, permiten la evacuación de cenizas; mientras que por

encima de este intervalo, provoca que toda la escoria se tenga que remover en forma líquida.

b) *Presión*: Los gasificadores que operan a presión atmosférica (de lecho fijo), pueden soportar una ligera presión positiva debida al aumento en el flujo de oxidante, también una presión negativa cuando existe succión.

Los gasificadores a contracorriente (*updraft*) operan casi siempre con inyección de oxidante; una presión positiva implicará mayores pérdidas particularmente durante la carga. Los sistemas de succión presentan menores problemas de pérdidas y son más utilizados en gasificadores de flujo concurrente (*downdraft*). Se puede decir en general que los gasificadores pueden trabajar a presiones atmosféricas o a presiones elevadas; sin embargo las variaciones de este parámetro y de la temperatura, afectarán directamente la composición del gas de síntesis que se obtenga (ver Figura 4.8 y Figura 4.9).

c) *Materia prima*: como se ha descrito, el tipo de materia prima que se elija define finalmente el tipo de tecnología que se va a utilizar, el comburente, el sistema de salida de gases, entre otras. Es importante considerar la granulometría y el estado físico de la materia prima empleada, es decir, debe estar en función de las exigencias operativas del gasificador.

d) *Humedad*: El poder calorífico (PC) del gas de síntesis final, depende en gran medida de la cantidad de humedad inicial del combustible; generalmente los sistemas de gasificación no son eficientes a humedades por encima del 30%. Por encima de este valor, la temperatura de reacción disminuirá y viceversa.

5.2.1 Sistemas de gasificación

En la Tabla 5.3, podemos observar algunas tecnologías que se han diseñado por distintas compañías, todas ellas se basan en alguno de los tipos de gasificadores

mencionados y presentan características distintas, desde condiciones de operación hasta la capacidad de cada una de ellas. Casi todas ellas basan sus procesos en la alimentación de carbón.

Tabla 5.3. Sistemas de gasificación

Sistema	Características
LURGI	Desarrollado por la Compañía Lurgi, Alemania. Se basa en un gasificador de lecho fijo. Se alimenta el carbón en la parte superior por medio de una tolva cerrada. P=30-35 atm Oxidante: mezcla de oxígeno y vapor T= 527-1127 °C en la zona de combustión T= 327 °C del gas de síntesis Capacidad= 5500 m ³ /h de gas seco a cond. Std.
WINKLER	Se basa en un gasificador de lecho fluidizado. P: atmosférica T= 797-1097 °C T= 327-527 °C gas producido Capacidad= 110 ton/día @ Patm y 1800 ton/día @ P=4atm.
KOPPERS-TOTZEK	Basado en un gasificador de flujo por arrastre. P: atmosférica Oxidante: oxígeno y vapor T= 1927 °C en la zona de flama T= 1487 °C gas de síntesis Capacidad= 210 ton/día de carbón
TEXACO	Basado en un gasificador de flujo por arrastre, presurizado y de alimentación lechosa. T= 1257-1487 °C en la gasificación Oxidante : oxígeno o aire No hay alquitranes u otros aceites Planta de ciclo combinado, capacidad= 900 ton/día de carbón. Gas producido: de Poder Calorífico medio.
SHELL	Desarrollado por Shell Oil Company. T= 127°C del gas obtenido Oxidante: oxígeno o aire con vapor Cuenta con sistema de limpieza del gas Si aumenta la Presión, se pueden obtener mejores resultados.
Gasificación bajo tierra	Presenta un principio similar a los gasificadores de lecho fijo. Presenta tres zonas: combustión, gasificación y volatilización. Gas producido: de Poder Calorífico medio. Presenta posibles impactos ambientales por contaminación del subsuelo.

FUENTE: Elaboración propia a partir de Nowaki, 1981. Parekh, 1982. Simbeck et al, 1983. Olness & Gregg, 1997.

5.2.2 Tecnologías actuales

En la actualidad existen diversas empresas que se han dedicado a perfeccionar cada vez más los procesos que se valen de los RSU para obtener productos diversos. A modo de ejemplo se citan a continuación algunas empresas con reconocimiento internacional, que se encargan de procesar RSU y residuos industriales, obteniendo como productos principales energía y gas de síntesis.

Tabla 5.4. Tecnologías y licenciadores en gasificación y pirólisis

Tecnología	Licenciador
Gasificación	Primenergy (RRA)
Gasificación	Omnifuel/Downstren Systems (Omni)
Gasificación	Whitten Group/Entech Renewable Energy System
Gasificación	Energy Products Idazo
Gasificación	Ebara
Pirólisis/reformado vapor	Brighstar Enviromental
Pirólisis	WasteGen Ltd/ Tech Trade
Pirólisis	Taylor Recycling Facility
Gasificación	EBARA
Combustión/Gasificación	LURGY
Pirólisis/gasificación	Interstate Waste Technologies/Termoselect

FUENTE: Elaboración propia a partir de diversas fuentes (folletos, páginas web y artículos) de las diversas compañías.

Se estima que para el 2010, el 15% de las nuevas plantas de tratamiento de RSU en Europa, estarán basadas en alguna tecnología de gasificación [DTI, 1998].

Existen actualmente otras empresas que han desarrollado sus propias variantes de gasificadores como EBARA Company [Fujimura et al, 2001, Selinger et al, 2003], Thermoselect [Yamada et al, 2004] y SVZ¹² (Schwarze Pumpe, Germany), patentando cada una de las variantes desarrolladas. A continuación se muestran los clientes que han tenido las dos primeras empresas, así como sus características (Tabla 5.5 y Tabla 5.6). Es necesario señalar, que no son las únicas, sin embargo, mediante una revisión exhaustiva, son las empresas de las que se cuenta con más información.

¹² www.svz-gmbh.de/

Tabla 5.5. Clientes de Ebara Company

CLIENTES QUE EMPLEAN LA TECNOLOGÍA DE EBARA		
CLIENTE	MATERIAL TRATADO	CANTIDAD
Sakata Local Clean Union	RSU	71540 ton/año
Ube City	RSU	72270 ton/año
Chuno Widerange Regional Union	RSU	61320 ton/año
Minami-Shishu Wide-Range Regional Union	RSU	61320 ton/año

FUENTE: Elaboración propia a partir de Fujimura et al, 2001, Selinger et al, 2003.

Tabla 5.6. Clientes de Thermostelect

CLIENTES QUE EMPLEAN LA TECNOLOGÍA DE THERMOSELECT			
CLIENTE	MATERIAL TRATADO	CANTIDAD	LÍNEAS
Fondotece, Italia	RSU	36500 ton/año	1
* Karlsruhe, Alemania	RSU	225000 ton/año	3
Mizushima Eco-Works Corp. (Okayama Pref.)	RSU	202575 ton/año	
Kenoukkanan Regional Environmental Association (Nagasaki Pref.)	RSU	109500 ton/año	
Cyuoukouiki Environmental Facility Association (Tokushima Pref.)	RSU	43800 ton/año	
Yorii ORIX Eco Services Corp. (Saitama Pref.)	RSU	164250 ton/año	
** Ticino, Suiza	RSU	150000 ton/año	—
** Japón, Korea, Berlín, Italia	RSU	—	—

* Fuera de operación

** En construcción

FUENTE: Elaboración propia a partir de Yamada et al, 2004.

La empresa Thermostelect¹³, se dedica al procesamiento de los RSU, sin embargo, no les da tratamiento alguno, los envía a una prensa que se encarga de compactarlos, con la finalidad de retirarles el exceso de líquido y el aire restante. Bajo un gran esfuerzo de compresión se forman, a partir de los desechos, tapones

¹³ Información consultada en la página electrónica: <http://www.thermostelect.com>

estancos al gas que son presionados por un canal de desgasificación con exclusión del aire. Al aumentar las temperaturas se van secando los desechos, los componentes orgánicos se desgasifican y al cabo de un breve lapso de tiempo, alrededor de una hora como máximo, son transportados de forma ininterrumpida al interior de un reactor de altas temperaturas.

Tabla 5.7. Plantas instaladas con tecnología de las empresas Ebara y Thermoselect, que tratan RSU

EMPRESA	PLANTA	CAPACIDAD (ton/año)
EBARA CORPORATION	Macomer, Italia	26,280
	Chuno Widerange Regional Union	61,320
	Minami-Shishu Widerang Regionla Union	61,320
	Sakata Local Clean Union	71,540
	Ube City	72,270
	Berlín, Alemania	73,000
	Gien, Francia	87,600
	Aomori	120,000
	Kawachi	157,680
	Japón	164,250
	Madrid, España	240,900
	Kuala Lumpur, Malasia	547,500
THERMOSELECT	Fondotece, Italia	36,500
	Cyuoukouiki Environmental Facility Association (Tokushima Pref.)	43,800
	Kenoukkenan Regional Environmental Association (Nagasaki Pref.)	109,500
	Yorii ORIX Eco Services Corp. (Saitama Pref.)	164,250
	Mizushima Eco-Works Corp. (Okayama Pref.)	202,575
	Karlsruhe, Alemania	225,000

FUENTE: Elaboración propia a partir de Fujimura et al 2001, Selinger et al 2003, Yamada et al, 2004, <http://www.thermoselect.com>.

En la Tabla 5.7 se puede observar que estas dos compañías cuentan con amplia experiencia en el sector de tratamiento de RSU. La empresa Ebara Corporation cuenta con plantas que manejan desde 262801 ton/año de RSU, hasta plantas con capacidad para procesar 547500 ton/año de RSU. Esta última, es la planta de gasificación para tratamiento de RSU más grande del mundo, cuenta con 5 líneas de proceso, que en su conjunto permiten tratar la cantidad de residuos señalada; se encuentra ubicada en Kuala Lumpur, Malasia.

Por su parte, la empresa Thermostelect, cuenta con 6 instalaciones, que procesan desde 36500 ton/año de RSU, hasta 225000 ton/año. Así mismo cuenta con cinco plantas en construcción, una en Ticino, Suiza y las restantes en Japón, Korea, Berlín e Italia.

5.3 Tecnología de plasma

El plasma es un gas que es esencialmente aire sobrecalentado. Las temperaturas de las partículas cargadas en el plasma pueden ser tan altas en sus colisiones, que pueden dar lugar a reacciones termonucleares. A diferencia de los metales que están limitados por sus temperaturas de fusión, el gas no tiene limitaciones por lo que alcanzan entre los 3000°C a los 8500°C; suficientes para suministrar la energía de activación necesaria para promover los cambios físicos y químicos de la materia, los cuales no pueden ocurrir cuando se calienta con baja temperatura de combustión convencional [Arvizu, 2001].

Los plasmas ocurren de forma natural pero también pueden ser obtenidos por el hombre, es decir, de manera artificial. Sin embargo el mecanismo de generación y estabilización de los plasmas en el laboratorio y la industria no son fáciles.

Comparando un plasma con un gas ordinario, se observa que el plasma contiene cargas libres, las cuales son producidas en el gas por una gran variedad de

procesos de ionización. Dependiendo del contenido energético del plasma, el grado de ionización puede ser tan alto que, prácticamente no contiene ninguna partícula neutra, es decir, es un plasma completamente ionizado.

Los plasmas presentan dos características principales de aplicación práctica: la primera es que pueden alcanzar elevadas temperaturas y densidades de energía más altas que las producidas por medios químicos y la segunda es que presentan la capacidad de producir especies energéticas, que pueden dar lugar a reacciones químicas muy difíciles o imposibles de obtener por medio ordinarios. Las especies energéticas que se generan cubren un amplio espectro. Con respecto a partículas cargadas se presentan electrones, iones y radicales; también se presentan algunas especies neutras altamente reactivas como átomos excitados de oxígeno y flúor, fragmentos de reactivos moleculares y fotones a diferentes longitudes de onda; lo que da a los plasmas la capacidad de iniciar cambios físicos en la superficie de los materiales.

En general se identifican dos tipos de plasma, el de equilibrio o plasma térmico y el de no equilibrio o plasma frío. Algunas de las características más importantes de un plasma térmico son las siguientes:

- a. Similitud entre las temperaturas de las partículas pesadas y los electrones ($T_e = T_h$)
- b. Existencia de equilibrio químico
- c. Densidad electrónica alta (10^{13} a 10^{16} cm^{-3})
- d. Alta energía de los electrones, del orden de 1 a 2 eV

Estas características propician que la temperatura en la periferia del plasma sea superior a 3700 °C, alcanzando hasta 19700 °C en el núcleo.

En contraste, los plasma fríos presentan las siguientes características:

- a) Presentan fuertes desviaciones en la cinética de equilibrio ($T_e \gg T_h$)
- b) Presentan bajas densidades electrónicas (10^9 a 10^{13} cm^{-3})
- c) Se presentan en ambientes de baja presión, incluso a la presión atmosférica.

5.3.1 Generación de un plasma térmico

Los plasmas pueden ser generados al hacer pasar una corriente eléctrica a través de un gas. Los gases a temperatura ambiente son buenos aislantes; sin embargo, un pequeño porcentaje de cargas son suficientes para que el gas pueda conducir la electricidad. Este proceso se conoce como rompimiento eléctrico y existen varias vías por medio de las cuales se puede lograr. El rompimiento eléctrico en un gas inicialmente no conductor establece el paso de una corriente eléctrica a través del gas ionizado entre dos electrodos; a este fenómeno se le conoce como descarga gaseosa.

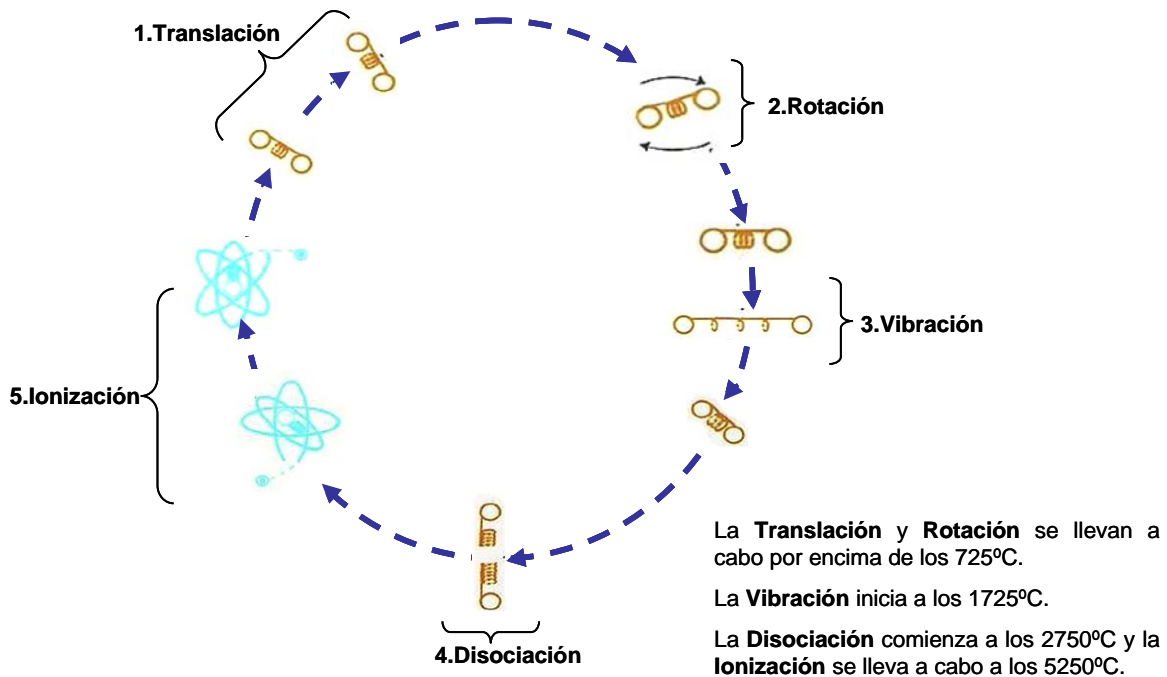


Figura 5.4. Creación del gas de plasma

FUENTE: Modificado de <http://www.fundacionenergia.es/>

El plasma térmico se puede generar mediante un dispositivo denominado antorcha de plasma, el cual consta de dos electrodos y una entrada de gas. El equilibrio entre electricidad y gas a través de los electrodos da como origen una flama de intensa luminosidad conocida como plasma. Para mantener constante el arco se requieren al menos dos electrodos para completar la trayectoria de los portadores de carga (iones y electrones) fuera y dentro del espacio gaseoso del arco.

Los mecanismos que existen para producir el plasma son: las antorchas no transferidas en corriente directa, las antorchas transferidas en corriente directa, las antorchas de plasma acopladas inductivamente y las combinaciones de los tres tipos anteriores.

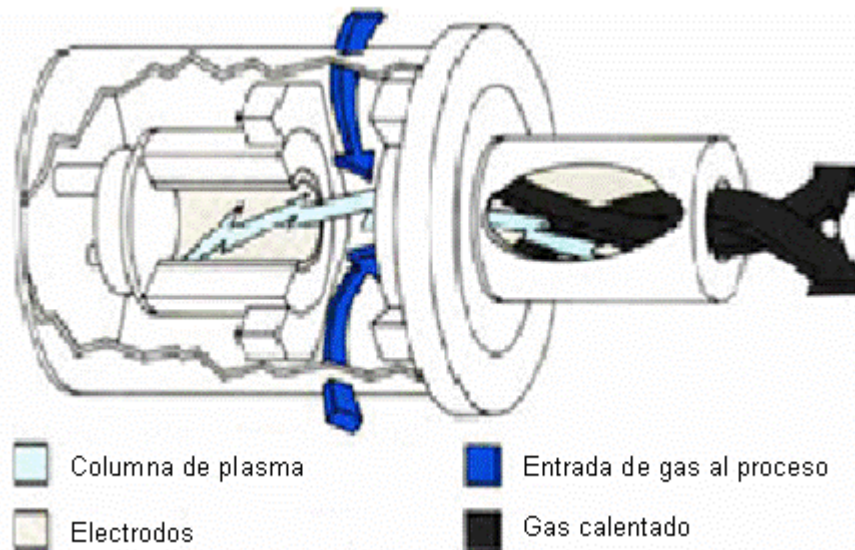


Figura 5.5. Diagrama de una antorcha de plasma térmico

FUNTE: www.egr-group.com/tech.html

5.3.2 Arcos térmicos

En la actualidad uno de los métodos más empleados para la gasificación por plasma es el que se conoce como “arco de plasma” o “antorcha de plasma”, en ocasiones ambos términos conducen a confusiones, sin embargo, a través de la experiencia se ha comprobado que el principio es exactamente el mismo y que la única diferencia radica en el nombre.

A diferencia de otro tipo de plasmas, los generados a partir de los arcos térmicos presentan las siguientes características.

a) *Densidad de corriente relativamente alta:* La densidad de corriente en una columna de arco puede alcanzar valores de 100 A/cm^2 . Esta situación es aún más pronunciada en los electrodos en donde pueden alcanzar densidades de corriente de 10^6 A/cm^2 . Por otro lado, las densidades de flux de calor se encuentran en el orden de 10^6 a 10^7 W/cm^2 .

b) *Caída de cátodo baja:* La distribución de potencial en un arco exhibe un comportamiento muy peculiar: el potencial cambia rápidamente en los electrodos, formando lo que se llama las caídas de cátodo y ánodo.

c) *Alta luminosidad de columna:* Este hecho representa una distinción clara entre la columna de arco y la columna de otras formas de descargas. La luminosidad extremadamente alta de la columna a alta presión, presenta aplicaciones diversas en el campo de la luminosidad, como lámparas de descarga a base de vapores de mercurio o sodio, que son empleadas en lugares como los aeropuertos y laboratorios.

Los arcos pueden iniciarse de distintas maneras:

a) *Por contacto de electrodos:* Si uno o ambos son móviles, el contacto de los electrodos puede ser establecido después de que un potencial eléctrico ha sido aplicado a ellos; propiciando una corriente de corto circuito que fluye sobre el punto de contacto, calentándolo lo suficiente para permitir una emisión termoiónica del cátodo. Al mismo tiempo, el material del electrodo es ionizado y evaporado en el punto de contacto, propiciando así tal cantidad de descargas, suficientes para desarrollar un arco.

b) *Por pre-ionización de la abertura de descarga de los electrodos:* Por este método existe una reducción del voltaje para que se pueda iniciar el arco a valores convenientes. Existen varias vías para que la región que separa los electrodos sea eléctricamente conductora; la más común es aplicar una chispa de alta frecuencia, capaz de generar una carga entre los electrodos. El otro método empleado es poner en contacto los electrodos por medio de un alambre delgado para generar el arco. El voltaje aplicado hace que el alambre explote, estableciendo así el arco.

En el caso de la optimización de las antorchas de plasma, se ha requerido la investigación de parámetros que determinan su diseño estructural y condiciones de operación. La mayor preocupación radica en los parámetros mostrados:

- Composición del gas de proceso
- Intervalo del flujo de gas
- Suministro de energía eléctrica
- Corriente del arco
- Dimensiones del ánodo

Se requiere que las operaciones de las antorchas en todos los casos sean fiables, reproducibles y económicas. Al variar cualquiera de éstos parámetros, las características eléctricas y térmicas de las antorchas pueden modificarse considerablemente. Inclusive la naturaleza del gas de proceso que se ocupe puede cambiar, es decir, en lugar de emplear aire, que es el que se emplea convencionalmente, se pueden ocupar gases como argón (Ar) o nitrógeno (N₂). [Benocci et al, 1998].

Un reactor con “arco de plasma” o “antorcha de plasma”, opera básicamente con un principio similar al de la soldadura con plasma, donde un arco eléctrico es pulsado entre dos electrodos. El arco de plasma se encuentra encerrado en una cámara y es el que se encarga de producir un gas altamente ionizado con una alta temperatura. El combustible (que en este estudio se enfoca en los residuos

sólidos) es alimentado dentro de la cámara, donde el intenso calor del plasma rompe las moléculas orgánicas (aceites, solventes, pinturas, RSU) para llevarlas a sus átomos elementales; los cuales se recombinan con gases como el dióxido de carbono, por medio de un proceso controlado con sumo cuidado. Los sólidos como vidrio y metales son fundidos para formar materiales similares a lava endurecida, en la cual los metales tóxicos quedan encapsulados.

5.3.3 Aplicaciones industriales del plasma térmico

Debido a la elevada cantidad de energía, los plasmas térmicos se han aplicado en diversos procesos industriales que requieren gran cantidad de calor; por ejemplo, en la soldadura de metales, aleaciones y deposición o revestimientos de materiales por proyección de polvos, en los calentadores de gas, síntesis química de materiales como pigmentos de TiO_2 , sílica sintética de alta pureza y polvos cerámicos ultra finos, por dar algunos ejemplos [Laroche, 1991].

La mayor parte del hardware de computadoras está hecho en base a tecnologías de plasma así como las grandes y delgadas pantallas de televisión, muy populares hoy en día; inclusive las empresas siderúrgicas han empleado durante muchos años el plasma para fundir el acero, por lo que el plasma es una tecnología bien establecida en muchas industrias. Ejemplos comunes de plasma son las luces de neón y los relámpagos. Otro aspecto importante es que pueden proveer un incremento en la eficiencia de algunos procesos y muy frecuentemente pueden reducir el impacto ambiental en comparación con procesos más convencionales. A pesar de la dificultad para estabilizar los plasmas, parecen tener muchas otras aplicaciones, incluyendo síntesis termonuclear, electrónica, láser y muchas otras.

También se ha empleado el plasma para el tratamiento de residuos peligrosos, ya que las altas temperaturas favorecen el rompimiento de los enlaces de las moléculas de los compuestos que forman los residuos peligrosos; obteniéndose como resultado una mezcla de partículas que se recombinan para formar gases y sólidos estériles, los cuales provienen principalmente de metales y vidrios

[Bonizzoni, 1993]. El rendimiento térmico de este proceso oscila entre un 50% a un 90%, siendo muy versátil para el tratamiento de diversos residuos sólidos.

5.3.4 Gasificación por plasma térmico

La Gasificación por plasma, consiste principalmente en la disociación molecular de los residuos en atmósfera reducida; emplea el calor producido por el plasma para gasificar los residuos, ya que se presentan temperaturas de operación del orden de los 2700° C. La temperatura del plasma oscila entre los 5000 y los 12000° C, produciéndose energía renovable a partir de residuos sólidos, lo que produce un impacto ambiental nulo.

Durante el proceso, se inyecta un gas comprimido (generalmente aire) a través de la antorcha, así la temperatura del arco eléctrico ioniza el gas produciendo el plasma.

Una de las ventajas principales de la gasificación por plasma, es que es un proceso cerrado (puede funcionar con poco o nada de oxígeno), que busca la destrucción total de los residuos que ingresan al proceso, con la ventaja de que no hay emisión de gases tóxicos, eliminando virtualmente la formación de dioxinas, furanos, NO_x, SO_x y otros gases tóxicos, ya que existe una completa disociación molecular y los elementos básicos pueden ser reformados en compuestos más estables.

Las altas temperaturas alcanzadas producen la disociación total de los residuos, teniendo finalmente dos productos principales, que son: el gas de síntesis y el slag vitrificado. El slag proveniente de la gasificación de RSU, presenta niveles de elementos tóxicos más bajos que los estándares actuales de la EPA en Canadá; es producido principalmente por la fundición y remoción de los componentes no volátiles del convertidor, tales como metal, concreto y vidrio, que están presentes en los residuos sólidos y que, por su tamaño no pudieron ser separados en la etapa de pretratamiento.

En la Figura 5.6 se puede observar la conversión de RSU a slag durante el proceso de gasificación por plasma, presentando una significativa reducción del volumen original.

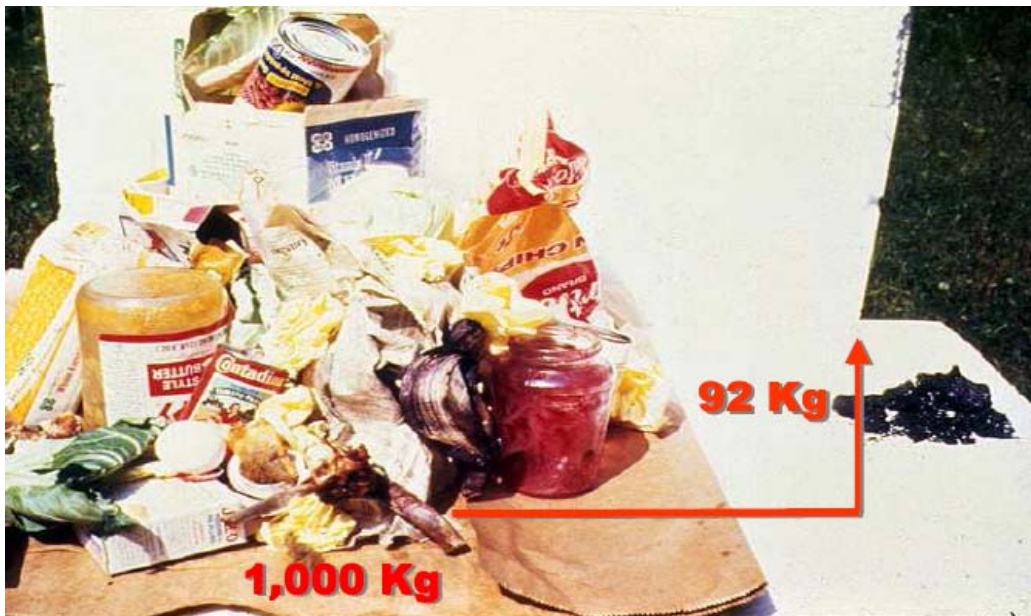


Figura 5.6. Reducción de RSU a slag

FUNTE: <http://www.fundacionenergia.es/>

El slag tiene diversas aplicaciones comerciales; por ejemplo, puede ser empleado para elaborar concreto, arcilla de azulejo, para elaborar productos decorativos ya que tiene un enfriamiento o templado controlado, como material para pared con una capa de hule espuma entre dos capas de producto slag, como material de relleno inocuo¹⁴, fabricación de tejas, fondo de carreteras, hormigón, aislamiento (lana de roca), pueda también ser empleado en la producción de lana mineral, en la manufactura de hule espuma y en el desarrollo de empaquetado de materiales, por mencionar algunos de sus usos actuales. [Carter, Tsangaris, 1994]. Dichos usos se pueden apreciar en la Figura 5.7.

¹⁴ En la actualidad no existe un estudio formal en el cual se establezca que el slag *per se* no es tóxico al contacto humano.

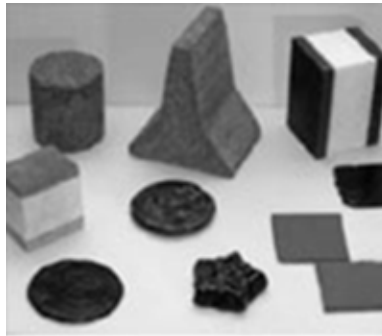


Figura 5.7. Algunos usos del slag

En la Figura 5.8 se puede observar la flexibilidad que existe para tratar diferentes residuos por medio de la tecnología de gasificación por plasma.

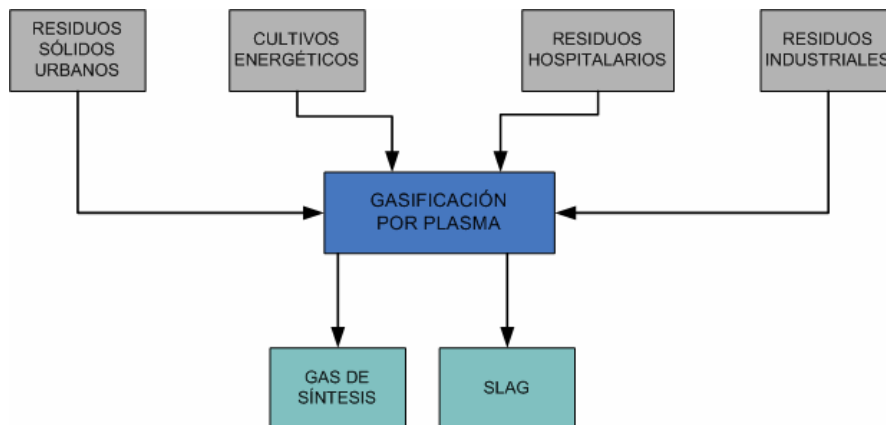


Figura 5.8. Tratamiento de residuos a través de la gasificación por plasma.

FUENTE: Elaboración propia

Cada uno de los residuos tratados, reaccionan de manera distinta produciendo, por una parte el gas de síntesis y por otra parte el slag.

En el siguiente ejemplo (Figura 5.9) se muestra un esquema de proceso para tratar RSU por medio de la gasificación con arco de plasma. Dentro de los componentes principales se encuentran la antorcha de plasma, el generador de potencia y el reactor de degradación de residuos. Esta figura pertenece a la Patente de Estados Unidos, número 5, 280, 757.

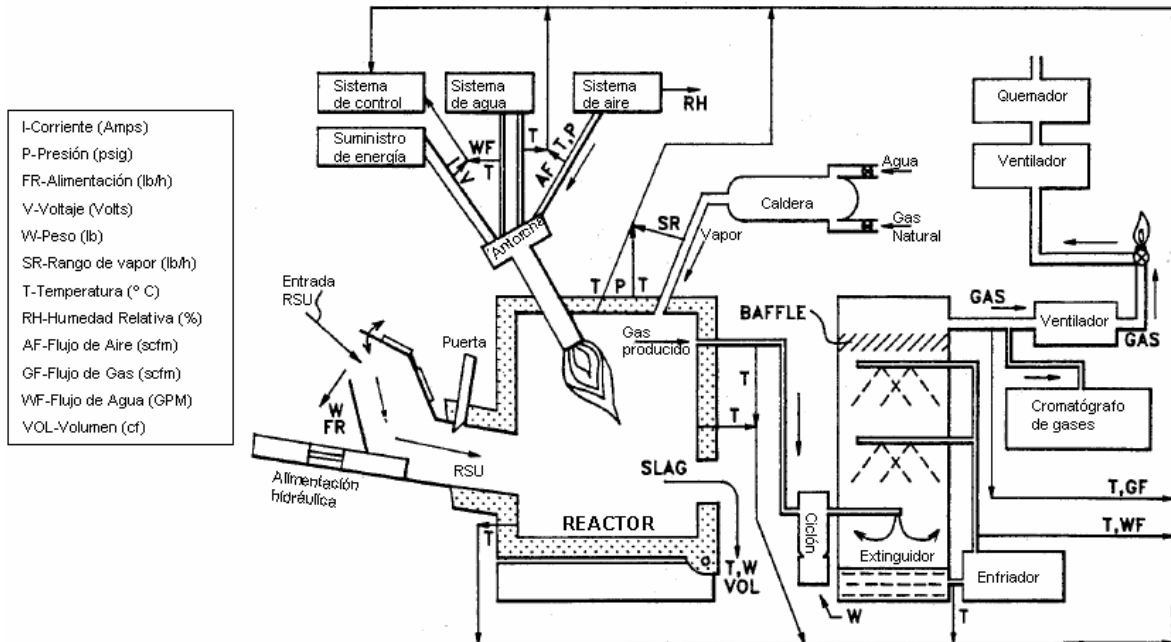


Figura 5.9. Esquema completo del proceso de gasificación por plasma.

FUENTE: Modificado de Carter & Tsangaris, 1994.

En este ejemplo, el proceso tiene como finalidad producir un gas de calidad media y un slag inerte. El gas producido contiene bajos niveles de metales, de dioxinas y furanos, y compuestos orgánicos semi-volátiles, y presenta un poder calorífico de 202.5 BT/ft³. En la Tabla 5.8 se puede observar la cantidad de metales que se detectaron en el slag producido durante el proceso mostrado en la Figura 5.9.

Tabla 5.8. Contenido de metales en el slag (µg/g)

Elemento de análisis	Soluble	No soluble
Aluminio	97000	101
Antimonio	9	2.36
Arsénico	2.5	ND ¹
Bario	1260	ND
Berilio	1	—
Bismuto	ND	—
Boro	170	—
Cadmio	1	ND
Calcio	107000	ND
Cromo	350	1.2
Cobalto	16	0.1

Elemento de análisis	Soluble	No soluble
Cobre	980	ND
Hierro	53000	70
Plomo	164	—
Litio	42	—
Magnesio	20000	ND
Manganeso	1810	0.7
Mercurio	0.3	ND
Molibdeno	3.5	ND
Níquel	62	ND
Fósforo	5000	—
Potasio	12800	ND
Selenio	ND	ND
Sílice	560	225630
Plata	ND	ND
Sodio	43000	23
Estroncio	320	ND
Telurio	ND	ND
Estaño	40	ND
Titanio	5900	677
Vanadio	43	0.14
Zinc	430	ND
Total µg/g	349964	226506
% de metales en el slag	35	23
% de metales totales	61	39

¹ND: No Detectado

FUENTE: Carter & Tsangaris, 1994.

5.3.5 Tecnologías actuales

En la actualidad, un gran número de instalaciones preliminares en el mundo, que se dedican al tratamiento de RSU, han sido modificadas: plantean diferentes esquemas y emplean generadores de plasma de diferentes tipos como un recurso energético. Se puede mencionar a StarTech^{MR}, Solena Group^{MR}, Geoplasma^{MR}, Europlasma^{MR}, entre muchas otras.

Debido a las grandes ventajas que representa a nivel industrial esta tecnología, existen alrededor del mundo diversas empresas que se han encargado tanto de su estudio como de su mejora, logrando obtener cada vez productos de mayor impacto comercial así como beneficios propios. A continuación se presenta un listado de diversas compañías que emplean actualmente la tecnología de plasma.

Tabla 5.9. Tecnologías actuales de plasma.

País o región	Características	Capacidad de tratamiento	Compañía que la utiliza.
Richland, Washington. EE.UU.	Tratamiento de mezcla de residuos (Combinación de residuos sólidos y radioactivos)	—	Allied Technology Group, Inc. (ATG)
Honolulu Hawaii EE.UU.	Residuos de hospital y otros residuos médicos	—	Asia Pacific Environmental Technologies (APET)
Lizuka, Japón	Residuos plásticos e industriales	10 ton/día	Fuji Kaihatsu
Okinawa, Japón	Eliminación de residuos Industriales para la demostración de eficiencia del sistema a autoridades japonesas.	—	Okinawa PCB and Asbestos Demonstration Unit
Taipei, Taiwan	Residuos médicos y baterías.	—	Global Plasma in Taiwan
Kuala Lumpur, Malasia	Residuos urbanos para la demostración del sistema de Plasma	—	BioPure Systems in Malaysia
Shimonoseki, Japón (Europlasma)	Horno incinerador de residuos sólidos tóxicos	42 ton/día	—
Bordeaux, Francia (Europlasma)	Incinerador de residuos tóxicos	10 ton/día	Communauté Urbaine de Bordeaux
Castelgalli, España (Plasco)	Planta piloto de gasificación de residuos sólidos.	5 ton/día	—

FUENTE: Elaboración propia a partir de información de Internet.

Una de las empresas que cuenta con la versatilidad para tratar los tres residuos que se mencionaron antes (sólidos, líquidos y gaseosos), es la empresa StarTech Plasma Converter System. El producto principal de este proceso es el gas de síntesis y cuentan con un sistema integral que incluye el lavado del gas de síntesis, denominado como PCG (gas convertido a plasma); durante este lavado

se reduce la temperatura del gas a 50°C. Por otra parte, el subproducto sólido que se obtiene (slag) no es tóxico ni soluble. Otra de las ventajas que ofrece esta tecnología, es que maneja capacidades que van desde las 5 ton/día, hasta las 50 ton/día, es decir, de 1825 ton/año y hasta 18250 ton/año.

5.4 Modelos para describir el proceso de gasificación

Para tratar de describir técnicamente algunos procesos, se recurre con frecuencia a los modelos, ya que permiten conocer previamente el funcionamiento de un proceso en su totalidad, a través de los diferentes parámetros que intervienen en su desempeño.

Específicamente, este trabajo se enfoca en el proceso de gasificación para el tratamiento de RSU, por lo que resulta conveniente conocer los tipos de modelos que se han empleado con anterioridad para modelar este proceso en particular.

Los modelos que han tratado de describir este proceso, generalmente siguen los siguientes principios en el desarrollo de sus cálculos:

- Equilibrio Químico
- Cinética Química
- Balances de Materia
- Balances de Energía

El propósito de modelar el proceso de gasificación es predecir e interpretar el desempeño de las siguientes características del gasificador:

- Calcular la composición y cantidad del gas de síntesis producido
- Intervalos de Temperaturas de operación
- Eficiencia del proceso

Dichas características se ven directamente afectadas por el tipo de combustible alimentado, parámetros de diseño y operación de proceso. El grado de detalle y la complejidad de los modelos matemáticos, dependen del tipo de gasificador que se busque representar y las tareas que se quieran realizar con dicho modelo, es decir, los resultados que se deseen obtener. A continuación se mencionan algunos tipos de modelos con los cuales es posible interpretar de mejor manera al proceso de gasificación [Del Valle, 2006]:

- *Modelos de caja negra:* usan datos experimentales para formar las correlaciones empíricas. Usualmente requieren pocas bases teóricas y poco esfuerzo matemático.
- *Modelos de equilibrio:* son valiosos para identificar los límites de conversión y los productos obtenidos, así como para predecir las condiciones de salida del reactor. Los modelos de equilibrio dan buenos resultados para sistemas de gasificación a altas temperaturas, donde las reacciones se aproximan rápidamente al equilibrio termodinámico.
- *Modelos cinéticos:* Los modelos cinéticos permiten describir las condiciones locales de un reactor, representando el proceso para conocer las condiciones de salida del reactor. Se basa en la representación matemática por medio de ecuaciones diferenciales de continuidad de energía y movimiento, incluyendo expresiones de velocidad de reacción, transferencia de masa y calor. Este modelo es el que proporciona una descripción más detallada del proceso, por lo que también requiere un gran número de parámetros, tales como energías de activación, datos de transferencia de calor, masa, entre otros. Asimismo, es necesario conocer previamente las ecuaciones cinéticas involucradas en el proceso, así como las variables termodinámicas que pueden interferir en él.

Para el caso que nos ocupa, se representará la gasificación por plasma, basada en un modelo de equilibrio, ya que es el que más se adapta a las necesidades del

presente trabajo, en el cual se busca identificar principalmente las condiciones del gas producido.

5.4.1 Simulador HYSYS

Como se ha visto, se pueden emplear distintos modelos para representar el proceso de gasificación; es por ello que en ocasiones se recurre a herramientas que permitan modelar los procesos para conocer de manera numérica, las diferentes variables que pueden influir en su desarrollo o simplemente para conocer las condiciones del producto principal. En este caso, se recurrirá al simulador HYSYS, que es uno de los tantos simuladores de proceso existentes, que permiten observar el comportamiento del proceso bajo ciertas condiciones de trabajo.

Este programa permite manejar datos de manera versátil, ya que los elementos de simulación que lo componen se adaptan a los mismos procesos que se están planteando.

El simulador Hysys es una herramienta que posibilita la creación de modelos dinámicos para el diseño de plantas, la supervisión del funcionamiento, la problemática, las posibles mejoras y, en general, permite tener una idea clara de la operación de la planta en particular. Por medio de esta herramienta se pueden manipular variables de proceso y operaciones unitarias, así como modificar completamente la simulación con requisitos particulares.

Las operaciones de los diversos procesos se pueden llevar a cabo de manera manual, consumiendo tiempo valioso y teniendo un porcentaje de errores bastante elevado, ya que la mayoría de las veces el procedimiento es realizar una serie de operaciones, obtener de dicha serie los resultados necesarios y posteriormente trasladarlos a una segunda serie de operaciones y así sucesivamente, cayendo, a fin de cuentas, en procesos iterativos. Sin embargo, todos estos pasos se pueden

resumir simplemente con la introducción de la información correcta a un paquete de datos y simplemente modificando las variables que se requieran.

Todo el trabajo antedicho se realiza dentro de un marco común, eliminando el tedioso proceso de acierto y error; ofreciendo así las siguientes ventajas:

- Contar con información compartida, en lugar de transferirla entre las aplicaciones.
- Todas las aplicaciones emplean modelos termodinámicos comunes.
- Todas las aplicaciones emplean simbología de flujo similar.
- Se requiere el entendimiento total únicamente de una interfase.
- Se puede cambiar entre modelos de aplicaciones en cualquier momento, obteniendo el mayor entendimiento del proceso completo.

Con la ayuda de este simulador se pueden calcular/modelar distintos tipos de operaciones unitarias entre las que se encuentran los reactores químicos. Dichas reacciones pueden ser de conversión, de equilibrio, heterogéneas, cinéticas, entre otras.

El simulador presenta diferentes tipos de reactores, para los cuales de acuerdo a su definición, se debe contar únicamente con un tipo de reacción. Por ejemplo, los reactores de equilibrio funcionarán correctamente con reacciones de equilibrio.; si se llega a colocar en un reactor de conversión una reacción cinética o de equilibrio, aparecerá un mensaje de error. Esto se encuentra dentro de las especificaciones establecidas por el programa, tanto los tipos de reactores como los tipos de reacciones y los requerimientos de cada uno.

Los reactores que se pueden simular con este programa son cinco diferentes: PFR, CSTR, Gibbs, Equilibrio, Conversión y General. La mayoría de ellos cuenta con ciertas particularidades que se deben especificar a lo largo de la simulación

para obtener mejores resultados y una aproximación mayor al proceso que sucede en la realidad.

El Reactor de Equilibrio es el que para nuestro caso específico, representa mejor el proceso de estudio.

5.4.2 Reactor de Equilibrio

El reactor de equilibrio es un modelo que simula reacciones de equilibrio. Para poder definir correctamente las reacciones de equilibrio, se requiere el conocimiento previo de la relación entre la constante de equilibrio (K_{eq}) y la temperatura. En este simulador, la constante de equilibrio puede especificarse por distintos caminos, sin embargo, se sabe que hay factores que modifican el equilibrio como son: un cambio en la Presión, en la Temperatura, en la concentración de las sustancias o en el volumen.

En el simulador, se considera que las corrientes de salida del reactor se encuentran en un estado de equilibrio físico y químico. Se puede definir un sistema de reacciones, en el cual se incluyen todas las reacciones que se llevarán a cabo dentro del reactor, la cantidad de reacciones que se puede incluir es ilimitada, se resuelven de manera secuencial o simultánea dependiendo de los requerimientos personales. No es necesario que las condiciones de proceso sean ideales, ya que HYSYS puede computarizar la actividad química de cada componente de la mezcla, basándose en las fugacidades de los componentes puros.

Se cuenta con un sistema de reacciones especificado inicialmente, sin embargo, se debe detallar también una reacción global, la cual, si en algún momento es modificada, afectará al sistema de reacciones, ya que esta reacción está unida a dicho sistema.

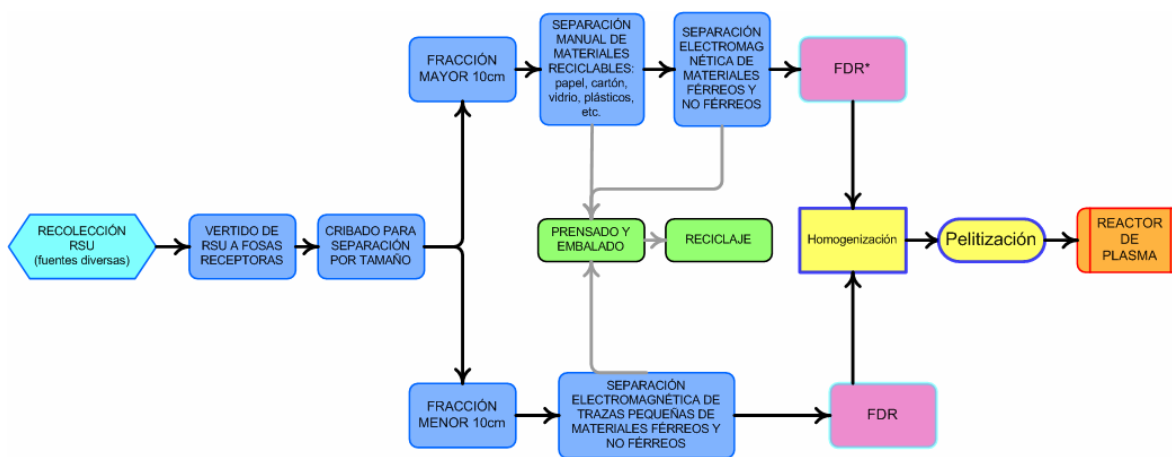
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han descrito los problemas involucrados en la generación de Residuos Sólidos Urbanos y las posibles alternativas que se han puesto en práctica con la finalidad de dar solución a un problema latente. Esto se ha hecho en primera instancia, con la finalidad de disminuir considerablemente el volumen que ocupan actualmente los RSU y, en segunda instancia, con la finalidad de que desaparezcan los sitios de disposición final que tantos problemas secundarios traen consigo (lixiviados y contaminación de suelos, por dar algunos ejemplos.).

La finalidad de este trabajo radica en que, tratando Residuos Sólidos Urbanos por medio de la tecnología de gasificación con arco de plasma térmico, se pueda obtener como producto principal gas de síntesis, el cual a su vez pueda ser empleado para obtener diversos productos útiles, dentro de los cuales destaca la generación de energía eléctrica. Durante el proceso de obtención del gas de síntesis (syngas, por sus siglas en inglés), se obtiene adicionalmente un subproducto llamado *slag*, el cual, al igual que el producto principal, puede ser empleado para procesos posteriores.

6.1 Propuesta de acondicionamiento para los RSU

Con la finalidad de incrementar la eficiencia del proceso y, para obtener el mayor beneficio posible de los RSU, éstos deben contar con algún tipo de pretratamiento o acondicionamiento para poder ingresar al reactor de plasma. De acuerdo con los pretratamientos que se emplean en la actualidad, se elaboró una propuesta de pretratamiento para RSU, la cual se puede observar en la Figura 6.1.



* En algunas ocasiones la Fracción de Rechazo (FDR), también se denomina Combustible Derivado de Residuos (CDR). Está constituida principalmente de materia orgánica.

Figura 6.1. Pretratamiento propuesto para los RSU

FUENTE: Elaboración propia a partir de la Tabla 4.17 y de la Figura 4.11.

Por medio de este pretratamiento, se logra obtener la mayor cantidad de materiales reciclables como plásticos, cartón, papel, vidrio, materiales férreos y no férreos, por medio del cribado, separación manual y separadores electromagnéticos; los cuales posteriormente se compactan para facilitar su traslado y los costos asociados al mismo y ser enviados a un proceso de reciclaje. También se logra la obtención de la mayor cantidad de fracción de rechazo posible (FDR), partiendo de dos vías: la fracción menor a 10cm y la fracción mayor de 10cm. La FDR se homogeniza para posteriormente elaborar pellets que permiten manejarla más fácilmente y darle un uso posterior.

El paso posterior a la elaboración de los pellets, es llevarlos al reactor de plasma, es por ello que en la Figura 6.1, se observa como paso posterior, el ingreso de los mismos al proceso de gasificación por arco de plasma.

Hoy en día, la versatilidad en el tratamiento de RSU por medio de la tecnología de gasificación por plasma es tal que permite procesar los residuos sin tratamiento previo; es decir, los RSU se pueden alimentar directamente al proceso de plasma tal y como son recolectados (por ejemplo Rellenos Sanitarios y Camiones Recolectores); a pesar de esta situación, resulta conveniente considerar un

tratamiento previo ya que, por una parte se obtendrían beneficios adicionales como la venta o reciclaje de productos específicos como papel, cartón, latas, PET¹⁵, por mencionar algunos; y se considera como un acondicionamiento de los residuos al reactor, con la finalidad de que ingrese al reactor la fracción de residuos que contenga mayor aporte energético al proceso (por ejemplo la FDR). Por otra parte se incrementa la eficiencia y vida útil del proceso *per se* y, finalmente, los resultados de este pretratamiento se ven reflejados en la cantidad y calidad de producto syngas¹⁶ que se obtiene.

6.2 Diferencias entre la gasificación por plasma y la gasificación convencional

La dificultad en hacer la comparación entre estas dos tecnologías, reside principalmente en que, como se ha hecho énfasis a lo largo de este trabajo, existen muchas variantes en los tipos de gasificadores, cada uno de los cuales cuenta con especificaciones particulares respecto a condiciones de operación, tipo y flujo de alimentación, así como productos obtenidos.

No obstante, muchas empresas se han dedicado o modificar las tecnologías existentes, con la finalidad de hacerlas más eficientes y por supuesto, más amigables con el ambiente. Por tal motivo, se decidió realizar una comparación técnica de ambas tecnologías, tomando como referencia empresas que procesan RSU; dicha comparación se presenta a continuación:

¹⁵ Polietileno tereftalato

¹⁶ Como se ha mencionado, el gas de síntesis también es llamado syngas por sus siglas en inglés. A partir de este momento, se usará ésta última connotación.

Tabla 6.1. Comparación entre la tecnología de gasificación convencional y gasificación por plasma

Datos técnicos	Gasificación convencional			Gasificación por plasma		
	Ebara Corporation	Thermoselect	SVZ Schwabe Pumpe	StarTech	Solena	Geoplasma
Capacidad mínima (ton/año)	26280	36500	NR	1825	8760	8760
Capacidad máxima (ton/año)	547500	225000	306600	18250		109500
Materia Prima	RSU	RSU	RSU	Residuos sólidos, líquidos y gaseosos	Biomasa, residuos sólidos, coque petróleo, carbón, residuos finos, RSU	RSU, residuos de construcciones, restos demoliciones, llantas, lodos residuales
Pretratamiento	NR*	Compactación	Compactación y pellets	Ninguno	NR	NR
Tipos de reactores	6	NR	3	NR	1	1
Temperatura en el reactor (máx. °C)	1450	2000	1600	1400	NR	NR
Temperatura de salida del gas después de un lavado (máx.°C)	NR	NR	500-700	650	NR	NR
Presión	atmosférica	NR	24.7 atm	NR	atmosférica	NR
Catalizador	Aire	Oxígeno	Vapor de agua/oxígeno	Vapor de agua/oxígeno	Aire u oxígeno enriquecido con aire	Aire
Producto principal	Syngas	Syngas	Syngas	Syngas	Syngas	Syngas
PC Syngas	NR	NR	NR	NR	150-130 BTU/scf	150-200 BTU/scf
Subproductos	Slag, metales, hidrógeno, amoniaco, materiales químicos	Slag, minerales, metales, sales, metales pesados, azufre	Slag	Slag, hidrógeno	Slag	Slag y metales
Eficiencia del proceso	48-51%	50-60%	NR	NR	NR	NR
Número de instalaciones en el mundo	14	8	NR	NR	NR	1
Ventajas	Reduce en un 30% las emisiones de CO ₂ . Produce energía eléctrica.	Bajas emisiones de dioxinas y furanos	NR	Disuelve cloruros, fluoruros, sulfatos, fosfatos, sodio y calcio	No hay emisiones de SVOC's**, NOx, cenizas, alquitrán, humo	NR

*NR: No Reportado

**Compuestos orgánicos semi-volátiles

FUENTE: Elaboración propia a partir de folletos informativos y documentos de las empresas.

La tecnología de gasificación cuenta con más antecedentes que la de gasificación por plasma, esto se debe a que esta última es prácticamente nueva y apenas está incursionando en el mercado mundial; pese a esto, se puede observar que presenta mucha más versatilidad en cuanto a tratamiento de materia prima se refiere. Otro punto favorable de esta tecnología es que los proveedores aseguran pocas o nulas emisiones contaminantes a la atmósfera y buena calidad tanto del producto principal (gas de síntesis), como del subproducto (slag).

La gasificación convencional trabaja a temperaturas menores que la gasificación por plasma, lo que propicia en algunos casos que el proceso de gasificación sea incompleto y puede dar lugar a subproductos residuales (alquitranes, escorias y cenizas).

Con la gasificación a altas temperaturas (plasma), se consigue la disociación molecular completa y consecuentemente se evita la presencia de Compuestos Orgánicos Semivolátiles (SVOC, por sus siglas en inglés) y la formación de dioxinas y furanos.

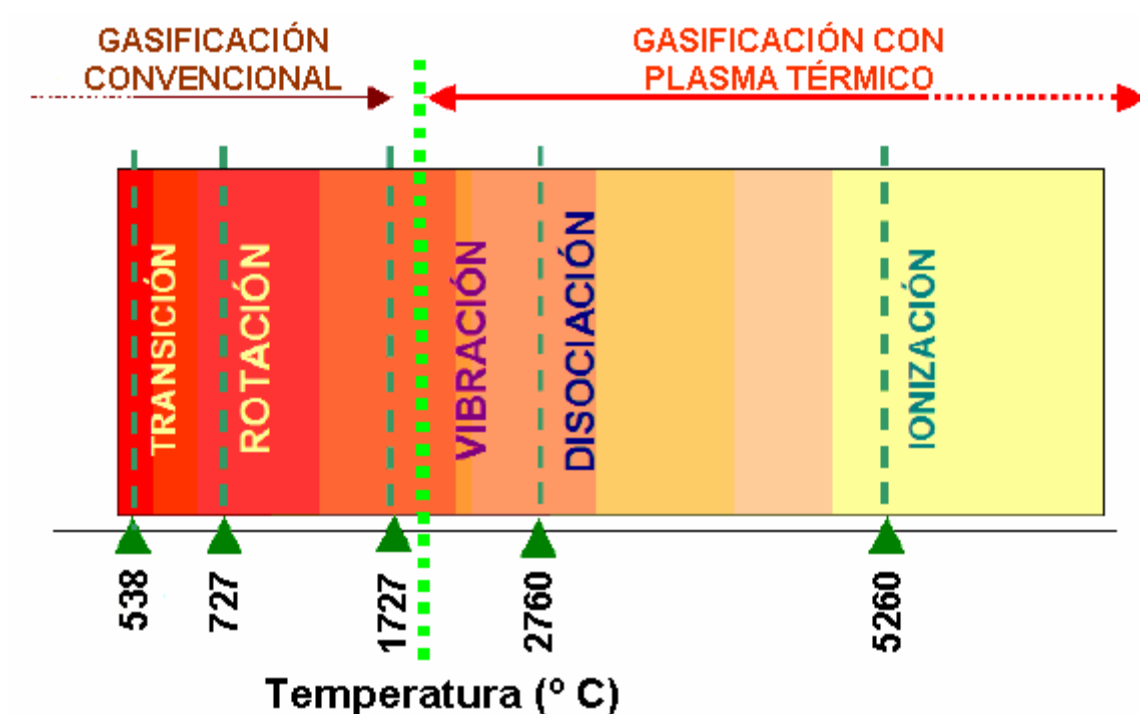


Figura 6.2. Características diferenciales

FUENTE: Modificado de <http://www.fundacionenergia.es/>

La tecnología de plasma se considera más viable, en comparación con la tecnología de gasificación convencional, debido a que:

- Presenta versatilidad en el tipo alimentación de materia prima.
- Presenta temperaturas en el reactor elevadas (hasta 2700°C, lo que permite la descomposición de los RSU, de acuerdo a la Figura 6.2).
- Asegura pocas o nulas emisiones contaminantes de gases tóxicos a la atmósfera.
- Presenta gran eficacia en la destrucción térmica.
- No genera efluentes líquidos.

Como producto principal, todas las tecnologías, o la mayoría de ellas, obtienen syngas o gas de síntesis y como subproductos también se pueden obtener hidrógeno o algunos metales fundidos aparte del slag.

Se han realizado diversas investigaciones con la finalidad de mejorar cada vez más la tecnología existente; dichas investigaciones residen en la modificación del proceso como tal, entre las que destacan: la variación del material que conforma los electrodos del arco de plasma, la longitud de dichos electrodos, la modificación de gases o catalizadores para la antorcha de plasma (Argón y Nitrógeno), variación del tipo de gasificador, del voltaje, entre otras [Benocci et al, 1998]. Todas estas experimentaciones se realizan con la finalidad de mejorar el proceso y poder proveer cada vez de una tecnología de mayor calidad, menor precio y mayores beneficios a la humanidad; es por ello que todos estos reportes buscan ser fiables, reproducibles y por supuesto económicos.

A pesar de todas las variantes que se puedan o no realizar a la tecnología y a las diferentes patentes que existen en torno a ella, el marco teórico en el cual se basan es el mismo, así como el objetivo que es tratar térmicamente los RSU, y así obtener la mayor cantidad de syngas y subproductos útiles o con algún valor agregado. Asimismo, se establece la permanente búsqueda de una tecnología que sea cada vez más amigable con el medio ambiente, reduciendo al máximo las emisiones contaminantes a la atmósfera, lo cual aseguran los tecnólogos, se puede lograr empleando la gasificación por plasma térmico, mostrando mínimas o nulas emisiones de gases tóxicos y subproductos nocivos a la salud.

6.3 Metodología de cálculo para el proceso

A continuación se describe de manera general la metodología de cálculo para los datos de entrada al simulador de procesos para la tecnología de gasificación por arco de plasma.

Para llevar a cabo la simulación de un proceso en cualquier simulador, es necesario realizar cada uno de los pasos que se muestran a continuación. En cada uno de ellos se explica la manera específica de cómo se define el esquema de proceso. Los pasos están numerados en el orden lógico en que se deben realizar, aunque no es necesario seguir la misma secuencia.

1. *Definición del diagrama de flujo de proceso y su alcance:* el primer paso para realizar la simulación de un proceso es definir sus límites, ya que es común que éste no se encuentre como un entidad independiente, sino que tenga flujos de materia y/o energía interconectados con otros procesos, de forma que si se altera el proceso en cuestión, se alteran los demás o viceversa. Es por esto que no siempre resulta fácil definir qué parte del proceso o qué procesos se deben simular. En este caso, sólo se toma en cuenta el reactor de plasma.
2. *Selección de unidades:* Se deben seleccionar las unidades en las que se van a especificar las variables de entrada y en las que se desean obtener los reportes de salida. Es posible escoger unidades de diferentes sistemas para las variables, incluso se pueden especificar diferentes unidades en cada operación unitaria y no es necesario que las unidades de entrada y salida sean iguales. En el presente trabajo se utilizan las unidades pertenecientes al sistema inglés; la razón por la que se eligió este sistema se basa en el hecho de que la información que se obtuvo del proceso real está reportada en dichas unidades, por lo que resulta conveniente al momento de hacer una comparación entre los resultados y datos previos.
3. *Selección del método o modelo para calcular las propiedades termo físicas:* Este es un paso clave para una buena simulación ya que desafortunadamente no existe una ecuación de estado o modelo para predecir las propiedades de todos los compuestos y todas las condiciones. Es por esta razón que se debe elegir el modelo que calcule con mayor precisión las propiedades de los compuestos que maneja el proceso a simular; de hecho, es posible utilizar diferentes ecuaciones de estado o

modelos termodinámicos en las distintas operaciones unitarias según lo requieran las condiciones de éstas, lo que le da mayor flexibilidad a la simulación. La ecuación elegida en este caso es la de Peng-Robinson.

4. *Partir el proceso en bloques de operaciones unitarias y escoger el modelo para cada bloque:* Este paso se realiza en una etapa que ya sólo se considera la sección de reacción. El modelo a utilizar en la simulación considera la operación unitaria de reacción llamada Reactor de Equilibrio.
5. *Definición de las corrientes de entrada y sus compuestos químicos:* En la Tabla 6.2, se muestra un resumen de las características de los RSU correspondientes.

Tabla 6.2. Características de los RSU para la simulación.

Cantidad de RSU a tratar	40 ton/h
Componentes	Masa (%) ^a
C	43.1
H	5.5
O	25.4
N ^b	2.7
S	0.2
Cenizas	23.1
Total	100
Humedad (%)	30 %

^a Estos valores son promedios obtenidos de las diferentes fuentes consultadas.

^b El resto de los porcentajes que complementan el 100% corresponde a cenizas y azufre.

Para cuantificar de manera correcta el comportamiento de los RSU, se plantea la premisa de que los RSU forman una molécula compleja, la cual se asemeja a un residuo sólido con ciertas características. La secuencia de cálculo empleada para la elaboración de dicha molécula se puede observar en la Figura 6.4.

Secuencia de cálculo formación de la molécula de RSU

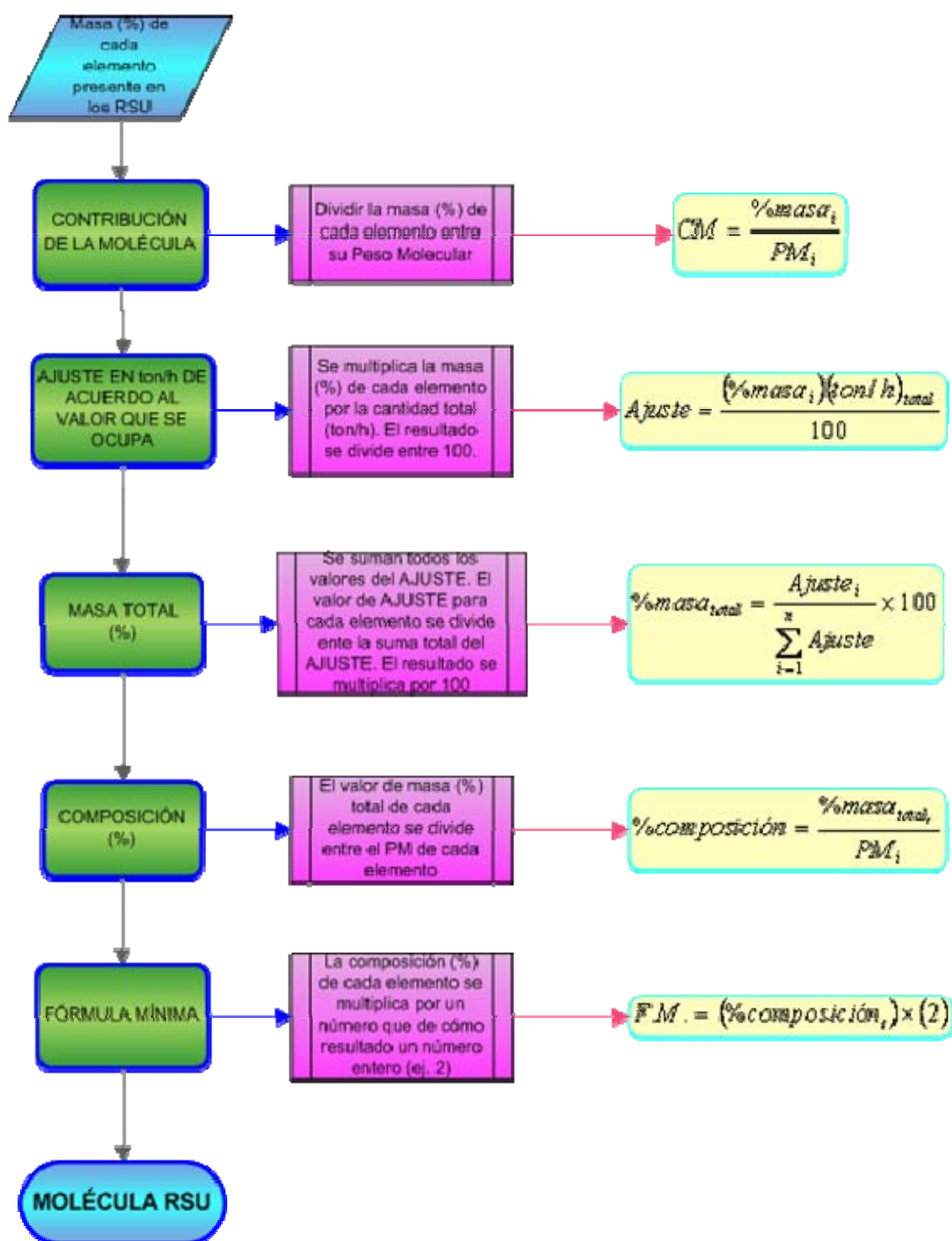


Figura 6.3. Secuencia de cálculo para elaborar la molécula de RSU

Para poder formar esta molécula, se retoman los datos mostrados en la Tabla 6.2, con estos valores se realiza un ajuste del valor de masa (%) para cada elemento, de acuerdo a la cantidad de RSU que se va a tratar, que en este caso serán 40 ton/h (muestra representativa). Con este valor posteriormente se obtiene la composición (%) relacionada con el Peso Molecular de cada elemento, para finalmente obtener la fórmula de la molécula, los resultados de esta secuencia de cálculos se muestran a continuación en la Tabla 6.3 y en la Tabla 6.4.

Tabla 6.3. Resultados del cálculo de la fórmula mínima para la molécula de los RSU

Elemento	Promedio (% masa)	Ajuste (ton/h)	Total (% masa)	Composición (% peso)	Fórmula mínima
C	43.1	17.24	56.19	4.68	9
H	5.5	2.2	7.17	7.17	14
O	25.4	10.16	33.12	2.07	4
N	2.7	1.08	3.52	0.25	1

Tabla 6.4. Contribución de cada elemento a la molécula

Elemento	Composición (%peso)	Contribución molécula
C	4.68	3.59
H	7.17	5.5
O	2.07	1.59
N	0.25	0.19

De lo anterior, la molécula definida queda de la forma: **C₉H₁₄O₄**, que es la molécula que se formará en el simulador. A pesar de que en la Tabla 6.3, aparece una aportación del Nitrógeno, ésta es mínima y no será considerada para la parte de la simulación. Además del C, H, O y N, se encuentra cierta cantidad de Azufre (S); sin embargo, no se considera como elemento perteneciente a la molécula ya que su aportación es mínima (0.2%) en términos porcentuales de composición respecto a los demás elementos. Para fines prácticos, el azufre se cuantifica en

términos de emisiones en el proceso, pero no se integra a la simulación como elemento constituyente de la molécula de RSU, sino como compuesto adicional al proceso en forma de ácido. Esta situación aplica de manera similar para el caso del nitrógeno (2.7%), el cual se considera en el balance como constituyente del aire y no de la molécula de RSU.

6. *Especificación de las condiciones de operación:* En esta parte se deben definir cuáles de las variables de operación se van a especificar en cada operación unitaria. El número de variables que se deben especificar depende de la operación que se desea representar. El simulador ofrece opciones de grupos de variables para cada operación unitaria. La elección correcta del conjunto de variables garantiza que el sistema llegue a la convergencia.

Existen diferentes variables que intervendrán en el proceso a simular, por lo que resulta necesario especificarlas antes de iniciar con la simulación. Dentro de las variables se encuentran las siguientes:

- Alimentación de oxígeno: Como parte del proceso se requiere la adición de aire enriquecido al 95% de oxígeno al reactor (el resto 5% será representado por el Nitrógeno), con la finalidad de favorecer la producción de CO; el alimentar aire enriquecido servirá para considerar al oxígeno como reactivo limitante y permitirá controlar su alimentación, evitando la formación en exceso de CO₂. La materia orgánica que entra aporta aproximadamente 2% del oxígeno total requerido por el proceso, que es de 30% para una combustión completa. Para la simulación se considerará el uso de 30% del oxígeno estequiométrico para la simulación. En la Tabla 6.5 se presentan las condiciones de alimentación de oxígeno a la simulación, en el simulador se introduce esta corriente como Aire.

Tabla 6.5. Condiciones de alimentación de oxígeno

Alimentación	Temperatura	Flujo (T/h)	Volumen O ₂ (%)	Presión (bar)
Aire enriquecido con oxígeno	25° C	3	95	1

- Alimentación de vapor: El vapor se emplea para controlar la formación de hidrógeno. Una parte del vapor es la cantidad de humedad contenida en los RSU que puede ser hasta un 50% máximo y como recomendación 5% a la entrada del reactor (arranque). El arranque del reactor se efectúa empleando vapor, lo que permite precalentar el reactor hasta la temperatura de proceso. Considerando el pretratamiento, los RSU contendrán aproximadamente 20% máximo de humedad total y están comprimidos prácticamente sin aire.
- Salida del slag: En el fondo del reactor se depositan materiales fundidos como vidrio, metales y cenizas, lo que le da al producto vitrificado estabilidad. El slag se considera casi en su totalidad como compuestos inertes y metales con un punto de ebullición inferior a 1300°C. La cantidad de inorgánicos que entra en el reactor es proporcional a la cantidad de slag a la salida; entre mayor sea esta cantidad, mayor será la energía consumida por las antorchas, se considera que la temperatura de salida del slag es exactamente igual a la que presentará el syngas (800° C).
- Gases de salida: El gas de síntesis se obtiene por la parte superior del reactor, con una temperatura aproximada de 800°C, a una presión ligeramente inferior a la atmosférica, la composición de dicho gas depende principalmente de la calidad de los compuestos de carbono y humedad de los RSU alimentados al reactor. Se requiere que tengan poca humedad, ya que al presentar valores altos de humedad se ocasionan altos gradientes de temperatura en el reactor, lo que origina más cantidad de energía en las antorchas para mantener el equilibrio térmico. Para la parte de la simulación es necesario establecer ciertas condiciones

de salida del gas de síntesis las cuales se muestran a continuación, con base en la Tabla 4.14.

Tabla 6.6. Características esperadas del gas de salida (gas de síntesis)

Componente	Composición (% volumen)
CO	0.20
H ₂	0.33
CO ₂	0.09
N ₂	0.32

FUENTE: Carter et al. 1994.

- Especificación de condiciones de diseño:* Muchas veces existen condiciones en el diseño que es importante conservar, ya que una pequeña alteración puede cambiar el comportamiento del proceso o las propiedades de los productos. En este caso sólo se debe tener cuidado con la determinación de dichas condiciones para no sobre-especificar el proceso. Se puede dar el caso de que si se añade una condición al proceso sea necesario modificar las condiciones de operación definidas, para que no existan redundancias que imposibiliten la convergencia.
- Definición de los métodos de convergencia:* El simulador genera automáticamente las secuencias de convergencia para las especificaciones de diseño y realiza dicha convergencia mediante el método de la secante para una sola especificación o el método de Broyden para dos o más especificaciones simultáneas; también acepta cualquier especificación de convergencia que el usuario quiera definir. La definición de métodos adecuados, además de garantizar la convergencia (en caso de que los datos estén alimentados correctamente), puede representar un ahorro de tiempo considerable, sobre todo en procesos con grandes dimensiones.

En la Figura 6.4 se puede observar la secuencia de pasos descrita para llevar a cabo la simulación.

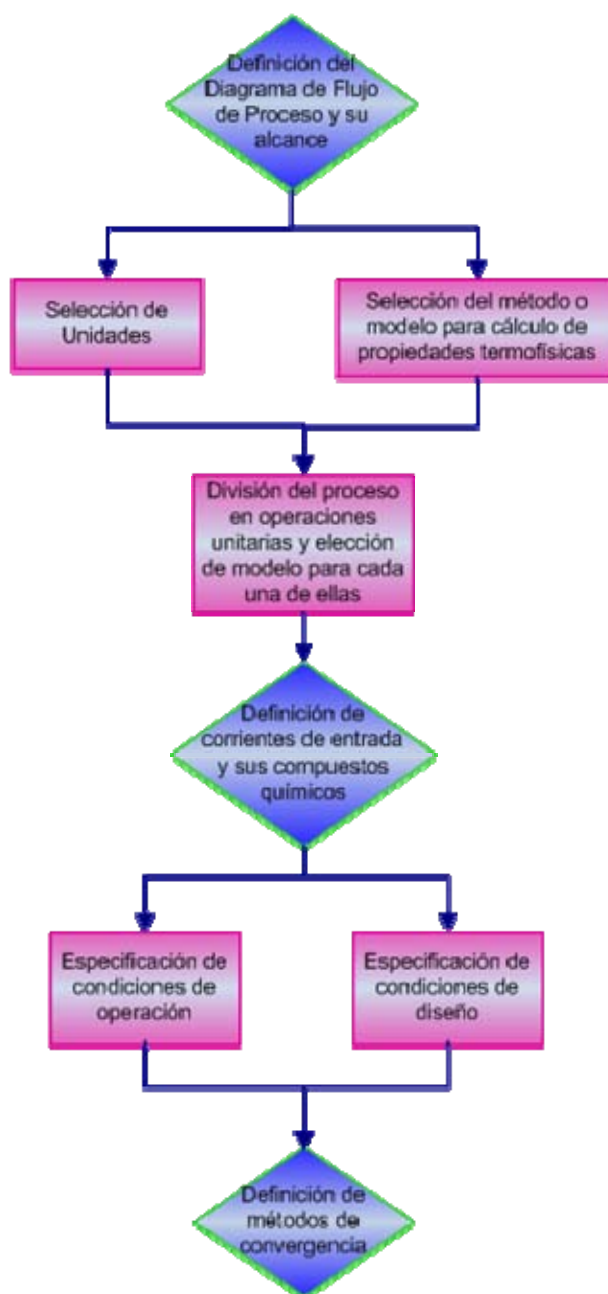
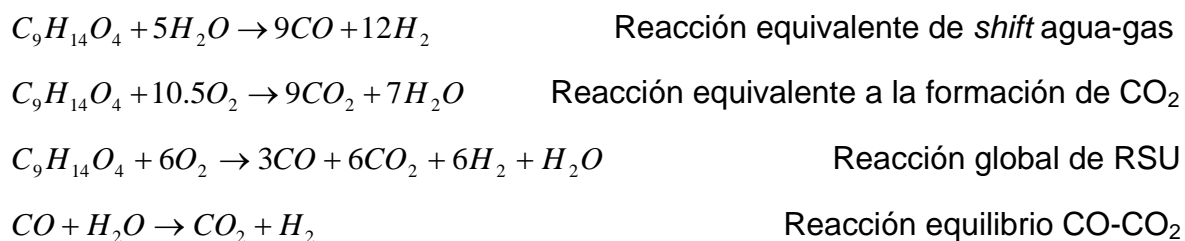


Figura 6.4. Secuencia de pasos para la Metodología de cálculo

FUENTE: Elaboración propia

El balance de ecuaciones para las reacciones principales que se llevan a cabo en el reactor de plasma (reactor de equilibrio), considerando la molécula formada de RSU, es:



Este es el paquete de reacciones que será introducido al simulador para que considere cada una de ellas dentro del reactor.

Los tiempos de residencia para que se alcance el equilibrio para la fase gas oscilan entre los 2 a los 4 segundos a 1200°C y para la fase derretida oscilan entre 1 a 2 horas.

6.4 Resultados de la simulación

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la simulación del proceso de tratamiento de los RSU mediante gasificación con arco de plasma. En la Figura 6.5 se pueden observar tanto las corrientes de entrada, como las de salida; también se puede observar el ambiente de simulación perfectamente conformado.

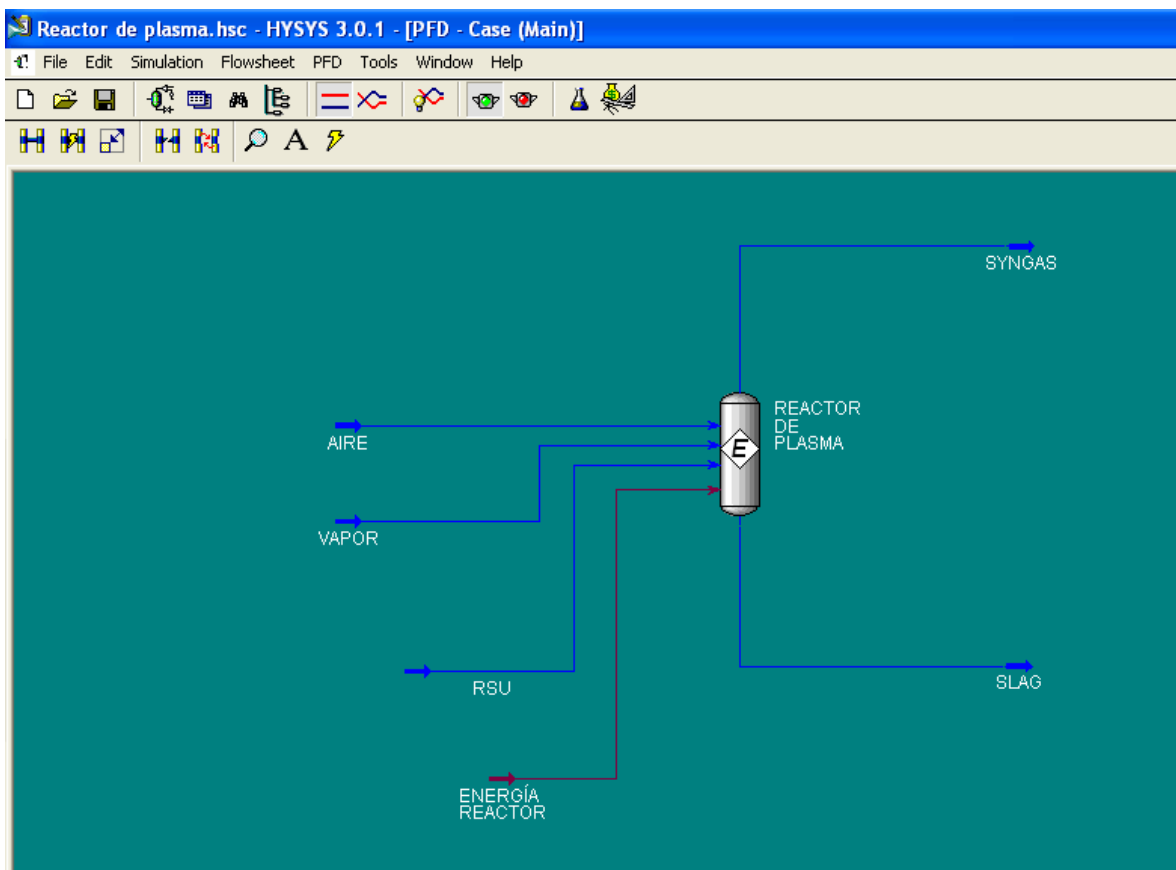


Figura 6.5. Diagrama de flujo del reactor de plasma en el simulador Hysys

Los resultados obtenidos de la simulación, para las 6 corrientes, se muestran en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. Resultados de la simulación

CORRIENTES DE ENTRADA					
	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (bar)	FLUJO (ton/h)	COMPOSICIÓN (fracción volumen)	
AIRE	25	1	3	O ₂	0.95
				N ₂	0.05
VAPOR	151.85	5	20	H ₂ O	1.0
RSU	25	1.01	40	RSU	0.33
				H ₂ O	0.38
				INORGÁNICOS	0.27
ENERGÍA REACTOR	—	—	37 (MW)	—	
CORRIENTES DE SALIDA					
	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (bar)	FLUJO	COMPOSICIÓN (fracción volumen)	
SYNGAS	800	1	51ton/h 106.6m ³ /h	H ₂	0.46
				N ₂	0.001
				CO	0.3
				CO ₂	0.14
				H ₂ O	0.082
				PC (kcal/kg)	3198.4
SLAG	800	1	12 ton/h	INORGÁNICOS	1.0

La corriente de aire contiene oxígeno al 95%; la corriente de vapor está conformada únicamente por agua; la corriente de los RSU está conformada por la molécula calculada (C₉H₁₄O₄), una porción de agua que representa la humedad contenida en los RSU y una fracción de inorgánicos; las relaciones de cada uno de los componentes anteriores de la corriente de RSU son aproximadamente 30% de inorgánicos, 10% de agua y el restante (60%) representado por los RSU secos. La corriente de energía del reactor representa la que se requiere para que se puedan llevar a cabo las reacciones en el interior del reactor; el valor obtenido por medio de la simulación es un valor muy alto (37MW), sin embargo este valor no necesariamente es la cantidad de energía requerida por el proceso; es decir, no se sabe exactamente cuánto de este valor requieran las antorchas de plasma, para conocer exactamente este valor se tendría que realizar un cálculo al respecto. Con respecto a las corrientes de salida, se encuentran a la misma temperatura ambas,

ya que es una de las variables que se tiene que definir para que el simulador pueda proporcionar los resultados y es un valor promedio de la temperatura de salida del syngas. Con relación a la composición esperada y resultante del syngas, se muestra a continuación una tabla comparativa (Tabla 6.8) y el porcentaje de error obtenido para cada componente incluyendo al poder calorífico (Tabla 6.9).

Tabla 6.8. Comparación de la composición del syngas (Valores esperados/Valores obtenidos)

Componente	Composición (Fracción volumen)		Diferencia valor absoluto [(Ve-Vo)]
	Valores Esperados ^a	Valores Obtenidos	
H ₂	0.33	0.46	0.13
N ₂	0.32	0.001	0.319
CO	0.2	0.3	0.1
CO ₂	0.09	0.14	0.05
H ₂ O	0.02	0.082	0.062
Poder Calorífico (kcal/kg)	3627 ^b	3198.4	428.6

^a Valores tomados de la referencia Carter & Tsangaris, 1994.

^b Este valor es el promedio de PC para los RSU calculado con base en la Tabla 4.11.

Tabla 6.9. Error en la composición del gas de síntesis obtenida

Parámetro	Error (%)
H ₂	28.3
N ₂	99.7
CO	33.3
CO ₂	35.7
H ₂ O	75.6
Poder Calorífico (kcal/kg)	11.8

De acuerdo a la Tabla 6.8, la diferencia entre los valores esperados, (que parten de un proceso de gasificación por plasma para RSU), y los valores obtenidos es

mínima, se puede observar que la diferencia mayor se presenta en el Nitrógeno y esto se debe a que la mayor aportación de este proviene de una parte de los RSU, la cual no fue considerada en el cálculo de la molécula de RSU y la única aportación de este compuesto proviene del aire y, hay que recordar que como es aire enriquecido con oxígeno, se consideró un 95% de oxígeno y el resto de nitrógeno (5%). Observando los valores de la Tabla 6.9, se observa que el porcentaje de error presenta valores mayores, sin embargo una de las características principales del gas de síntesis es que, cuando es más rico en CO y H₂, es un gas de síntesis de mayor calidad; considerando estos dos parámetros podemos ver que con respecto al H₂, el valor obtenido es mayor, por lo que el valor del porcentaje de error de 28.3 corresponde a un 28.3% más del valor esperado. Algo muy similar sucede para el caso del CO, donde se esperaba un valor de 0.2 y se obtuvo un 0.3 de fracción volumen, lo que nos señala que el valor de 33.3%, corresponde a 33.3% más del valor esperado. Estas dos características nos señalarían entonces, que el gas de síntesis obtenido es un gas de síntesis de mayor calidad que el esperado. Con respecto al valor del Poder Calorífico, se observa que es muy similar, y la diferencia entre el valor esperado y el obtenido es del 12% aproximadamente.

El balance de materia para el proceso de gasificación con plasma térmico se representa en la Figura 6.6.

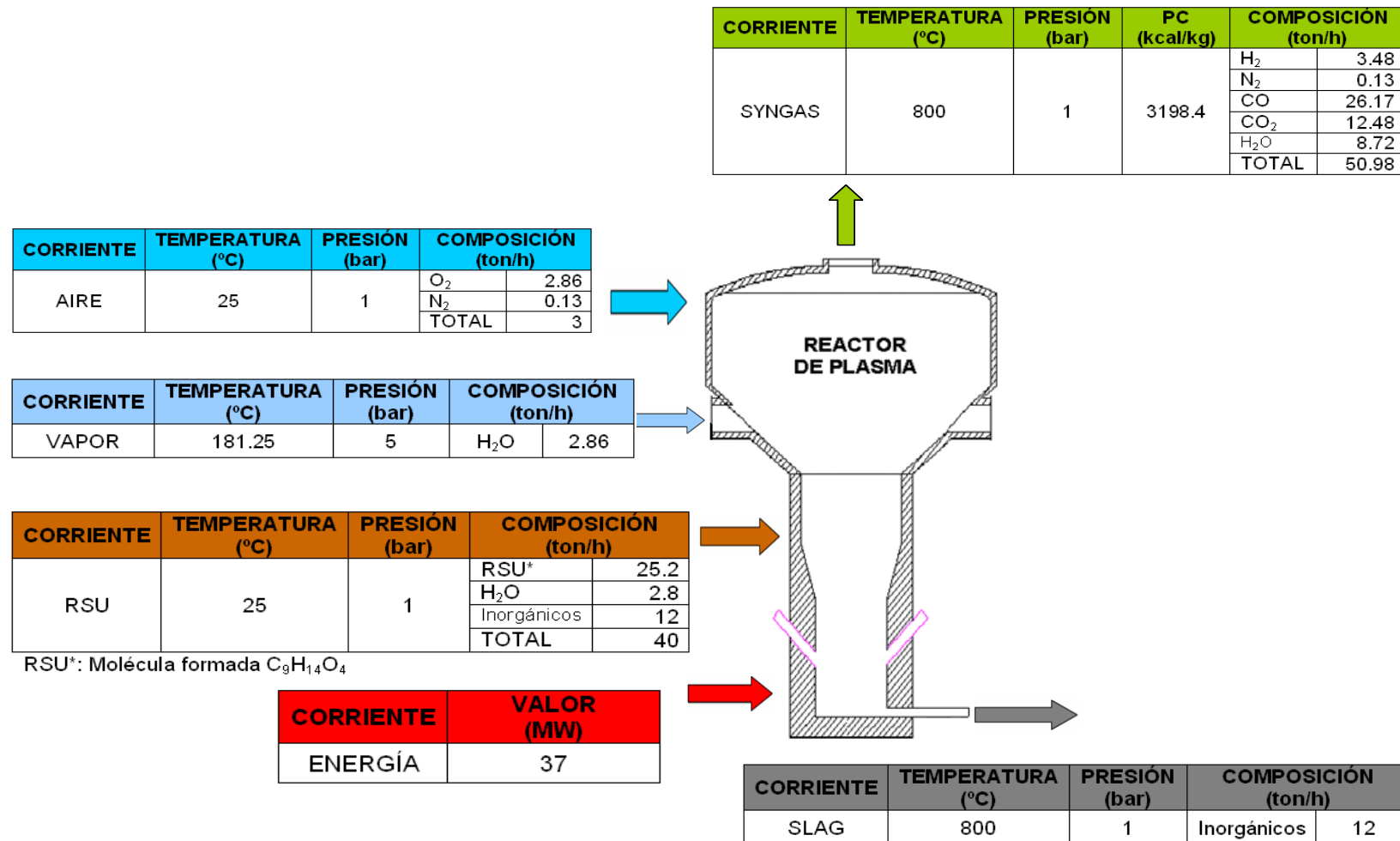


Figura 6.6. Balance de materia a la entrada y salida del reactor de plasma

En la Figura 6.7 se muestra el diagrama de flujo simplificado para la producción de gas de síntesis, elaborado en AutoCad del proceso simulado.

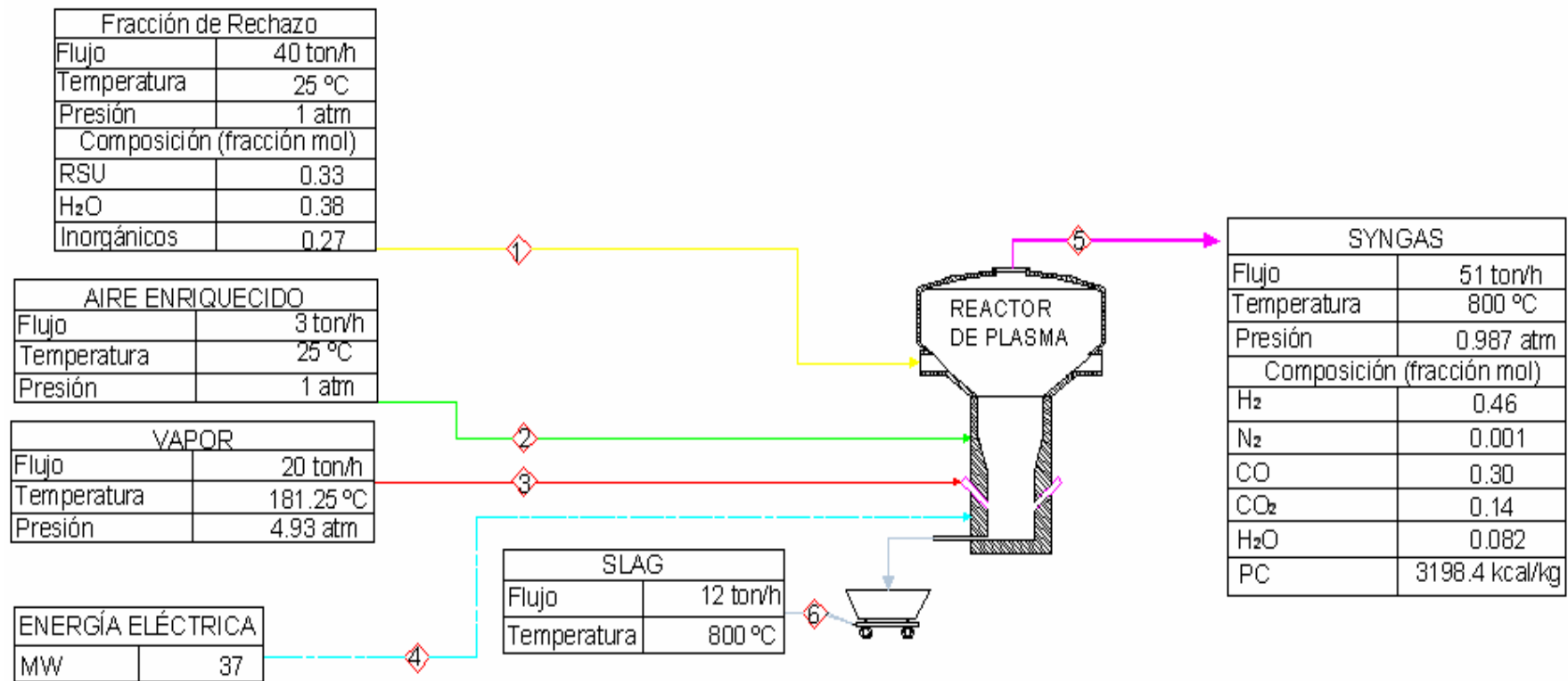


Figura 6.7. DFP simplificado del sistema de generación de gas de síntesis por arco de plasma

7. CONCLUSIONES

En el presente caso de estudio para un flujo de 40 ton/h de RSU, constituido de 43% de Carbono, 5.5% de Hidrógeno, 25.4% de Oxígeno y 2.7% de Nitrógeno; con un contenido de humedad del 30%; se demostró mediante la simulación realizada en el programa Hysys, que es posible (mediante la gasificación por arco de plasma), obtener aproximadamente 107m³/h de gas de síntesis o syngas con un poder calorífico (PC) de 3198 kcal/kg. Lo anterior representa una propuesta ambientalmente amigable para la obtención de gas de síntesis a partir de RSU, ya que la tecnología planteada no contribuye a emitir gases contaminantes que afectan a la atmósfera, tales como los gases de efecto invernadero. Uno de los usos más comunes del gas de síntesis es la generación de energía eléctrica, por lo que puede ser usado en procesos posteriores para tal efecto.

Se planteó el esquema de proceso para el tratamiento térmico de los RSU, a partir de la gasificación por arco de plasma térmico, para obtener como producto principal gas de síntesis, cuya composición elemental está en función de las condiciones de proceso.

Se elaboró una propuesta técnica a través de un diagrama de bloques para aplicar un pretratamiento o en su caso un acondicionamiento a los RSU dependiendo del destino final de uso de los mismos. La aplicación de un acondicionamiento de los RSU para utilizarlos en el proceso de gasificación por arco de plasma, permite incrementar la eficiencia del proceso, ya que al reactor entrará únicamente la fracción de rechazo FDR de los mismos; es decir, la fracción orgánica que constituye los RSU. Por otra parte, se separarán de los RSU los materiales susceptibles de reciclaje, dándoles así un uso comercial posterior.

El uso de la tecnología de gasificación por plasma como el proceso seleccionado para tratar térmicamente los RSU, se justificó por medio de una comparación de la misma con tecnologías que han desarrollado procesos similares. Dicha comparación se centró en las tecnologías de gasificación convencional y

gasificación por arco de plasma, ya que ambas han incursionado en gran medida en el mercado mundial. Dicha comparación permite concluir que la tecnología de arco de plasma procesa de manera más eficiente los RSU, representa una fuente de energía renovable y limpia, permite a largo plazo alcanzar el objetivo de vertedero cero (Rellenos Sanitarios), permite vitrificar los componentes inorgánicos de los RSU (slag), entre otras razones técnicas y ambientales.

Finalmente, con el objetivo de conocer el comportamiento de los RSU al ser procesados por medio de la tecnología de plasma térmico, la herramienta de cálculo empleada fue el simulador de procesos Hysys, el cual permitió definir las variables de proceso involucradas para esta tecnología de acuerdo a la reacción principal que se lleva a cabo, así como las corrientes asociadas tanto de entrada al reactor de plasma (aire, vapor, RSU, energía), como de salida (gas de síntesis o syngas y slag), obteniendo como resultados las condiciones de temperatura, presión, composición y flujos del sistema.

8. PERSPECTIVAS

El presente trabajo se centró en la modelación de la producción de gas de síntesis a partir de residuos sólidos urbanos. El gas de síntesis tiene diversas aplicaciones que incluyen la producción de metanol (materia prima para diversos procesos petroquímicos), la producción de hidrógeno (gas combustible o insumo en procesos en refinerías) y la producción de energía a través de calderas (sistema poco recomendado por su baja eficiencia) o turbinas de gas. En este último escenario, con base en información bibliográfica y con resultados obtenidos en el presente trabajo se estima que 1 ton/h de RSU, con un contenido de humedad inferior a 30%, un contenido de residuos orgánicos de mínimo 40%, utilizando islas de potencia (ciclo combinado: turbina de gas y turbina de vapor) es posible obtener entre 0.5 y 1.5 kWh de los cuales se autoconsumen en el proceso un máximo de 30%. Aunque no se consideró en el alcance del presente trabajo, se tienen datos que indican que el procesamiento de una tonelada de RSU representa un costo de \$280.00 M.N. los cuales están distribuidos en 80% de transporte, 17% de pago de derechos al municipio y 3% de otros costos (ej. Recolección, disposición final, por mencionar los principales).

Con base en la información anterior, los trabajos futuros que se recomienda realizar son:

Modelación de la producción de metanol a partir del gas de síntesis y posterior modelación de la cadena petroquímica derivada del metanol

Modelación de la producción de hidrógeno a partir de gas de síntesis incluyendo los procesos de separación correspondientes

Modelación de la producción de energía eléctrica en islas de potencia de última generación.

9. REFERENCIAS

- ARVIZU-Fernández J. L. (2001) "Estimación del recurso y prospectiva energética de la basura en México". Instituto de Investigaciones Eléctricas. México.
- BALBOA, J. "México produce al día 100 mil toneladas de residuos sólidos". La Jornada. México, 2007.
- BENOCCI, R., FLORIO, R., GALASSI, A., PAOLICCHIO, M. PISELLI, M. SALA C. SCIASCIA, M. SINDONI, E. (1998) "Experimental study for the optimization of plasma torch operations". The European Physical Journal D. Italy.
- BONIZZONI, G. (1992) "Plasma Arc Technology for Toxic Waste Treatment and Metal Production: Industrial Applications and Perspectives", Industrial Applications of Plasma Physics. Italia. P.199-219.
- BRASTEV, A. N., POPOV, V. E., RUTBERG, A. F., SHTENGEL, S. V. (2005) "A Facility for Plasma Gasification of Waste of Various Types". Plasma Investigations. Institute of Electrophysics and Electrical Power Engineering, Russian Academy of Sciences. Russia.
- CABANILLAS-Cabanillas A. (2007) "Gasificación de Residuos". Conversión energética. España.
- CARTER W. G., TSANGARIS, A. (1994). "Municipal Solid Waste Disposal Process". U. S. Patent Number 5280757.
- COTA-Sánchez G. (1998) "Estudios de degradación de residuos peligrosos mediante plasma térmico". Tesis de Maestría. Facultad de Química, UNAM. México.
- CZUCZWA, J. M., HITES, R. A. (1984). "Environmental Fate of Combustion-Generated Polychlorinated Dioxins and Furans". Environmental Science and Technology. 18(6). 444.
- DEL VALLE-Medina, K. (2006). "Modelo termodinámico del proceso de gasificación para residuos de gasificación". Tesis de Maestría. Facultad de Química, UNAM. México.
- DTI, (1998) "Gasification of solid and liquid fuels for power generation". Technology status report TSR 008. Department of trade and Industry, UK.
- ELÍAS, Xavier. (2002). "La incineración de Residuos Sólidos, inertes y peligrosos". Presentación. Medellín.

- FUJIMURA, H., OSHITA, T., NARUSE, K. (2001). "Fluidized-Bed Gasification and Slagging combustion System". Ebara Corporation. EUA.
- GREEN, D. W., PERRY, R. H. (1984). "Perry's chemical engineer's handbook". 6ta edición. McGraw-Hill. México.
- HIGMAN, C. Van der Burgt, M. (2003). "Gasification". Ed. Elsevier. EUA.
- LAROCHE, G. (1991). "Les Plasmas dans L'Industrie". Electricité de France. Francia.
- LESME J. R. (2000). "Gasificación de biomasa". Universidad de Oriente. Presentación. Cuba.
- LGPYGIR (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos). *Diario Oficial de la Federación*.
- MORA-Reyes J. A. "El problema de la basura en la Ciudad de México". Fundación de Estudios Urbanos y metropolitanos, Adolfo Christlieb Ibarrola. México, 2004.
- NMX-AA-022-1985. Protección al ambiente- contaminación del suelo- residuos sólidos municipales- selección y cuantificación de subproductos. *Diario Oficial de la Federación*.
- NMX-AA-033-1985. Protección al ambiente- contaminación del suelo- residuos sólidos municipales- determinación del Poder Calorífico Superior. *Diario Oficial de la Federación*.
- NOM-098-SEMARNAT-2002. Protección ambiental- Incineración de Residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. *Diario Oficial de la Federación*.
- NOWACKI, P. (1981). "Coal gasification Processes, energy Technology Review". No. 70, Noyes Dta Corporation, EUA.
- OCHOA-Torres J. S. (2001). "Simulación numérica del proceso de gasificación para la utilización de carbón o coque de petróleo". Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- OLADE, (1997). "Manual de Gasificación". Organización Latinoamericana de Energía (UNESCO).
- OLNESS, D., D. W. Gregg. (1977). "The historical development of underground coal gasification". U. S. Energy Research and Development Administration Report, University of California, EUA.

- PAAREKH, R. D. (1982). Handbook of gasifiers and gas treatment systems. U. S. Department of Energy Report, USA.
- PACHECO-Yáñez J. L. (1994). "Reuso de residuos sólidos". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- REZAIYAN, J., CHEREMISINOFF, P. N. (2005). "Gasification Technologies: A primer for Engineers and Scientists". Taylor & Francis Group. United States of America. Pp 64-67, 158, 160-164.
- SECRETARÍA DE ECOLOGÍA, Dirección General de Normatividad y Apoyo Técnico. "Análisis del Mercado de los Residuos Sólidos Municipales Reciclables y Evaluación de su Potencial Desarrollo". GTZ. México, 1999.
- SEDESOL (1999). "Situación actual del Manejo integral de los Residuos Sólidos en México". México.
- SELINGER, A., STEINER, Ch., SHIN, K. (2003). "TwinRec Gasification and Ash Meeting Technology-Now Also established for Municipal Waste". EBARA Corporation. Suiza.
- SIMBECK D. R., DICKENSON, R. L., OLIVER, E. D. (1983). "Coal Gasification systems: A guide to status, applications and economics". Final Report, electric Power Research Institute and Synthetic Fuels Associates. C. A., EUA.
- TANGRI, N. (2005) "Incineración de Residuos: una tecnología muriendo". Alianza Global Anti-Incineración (GAIA). Argentina.
- TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S. A. (1994). "Gestión Integral de Residuos Sólidos". McGraw-Hill. España. 65, 69-70, 612, 715-721.
- YAMADA, Sumio., SHIMIZU, M., MIYOSHI, F. (2004). "Thermoselect Waste Gasification and Reforming Process". Reporte Técnico. No. 3. EUA.

PÁGINAS WEB

- ANTORCHAS de plasma para energía y el medio ambiente. Empresa dedicada a la implantación de instalaciones alrededor del mundo para tratar residuos por medio de antorchas de plasma. <http://www.europlasma.com> (Consulta: Agosto, 2007).

- CORTÉS, S. (2006). "Las Soluciones tecnológicas para el aprovechamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos". <http://www.fundacionenergia.es/> (Consulta: Septiembre, 2007).
- FUNDACIÓN para estudios sobre la energía. Fundación española dedicada al análisis de fuentes alternas de energía. <http://www.fundacionenergia.es/> (Consulta: Agosto, 2007).
- GIL, D. J. (2006). "Valoración energética de la fracción de combustible de los RSU". Centro de tratamiento integral de residuos "Las Lomas". Presentación. Urbaser. <http://www.upcomillas.es/> (Consulta: Septiembre, 2007).
- HIDALGO, J. (2006). "Transformando los Residuos en Energía". Seminarios sobre tecnologías energéticas para Biomasa y Residuos. <http://www.fundacionenergia.es/> (Consulta: Agosto, 2007).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). México. Estadísticas. <http://www.inegi.gob.mx> (Consulta: Agosto, 2007).
- INE (Instituto Nacional de Ecología). México. Estadísticas. <http://www.ine.gob.mx> (Consulta: Octubre, 2007).
- MARTÍNEZ-Madrid D. (2007). "Gasificación de estiércol de vaca, una opción ecológica". Agua y Desarrollo Sostenible, Periódico OnLine. México. <http://www.expoagua08.com/20070124-gasificacion-del-estiercol-de-vaca-una-opcion-ecologica.html?moderar=157> (Consulta: Agosto, 2007).
- PLASCO Energy Group. Empresa canadiense dedicada a la conversión de residuos para generación de energía. <http://www.plascoenergygroup.com> (Consulta: Agosto, 2007).
- PORTAL Latinoamericano de Residuos Sólidos, Gestión Integral de Residuos Sólidos. Portal dedicado al análisis de experiencias relacionadas con la Gestión Integral de Residuos Sólidos en Latinoamérica. <http://www.giresol.org> (Consulta: Agosto, 2007).
- RECOVERED Energy System. Empresa dedicada a la generación de energía eléctrica y etanol a partir del tratamiento de RSU. <http://recoveredenergy.com> (Consulta: Septiembre, 2007).
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). México. Estadísticas (1994). <http://www.sedesol.gob.mx> (Consulta: Septiembre, 2007).

- SEDESOL (Subdirección de Asistencia Técnica a Organismos Operadores Urbanos Regionales). México. Estadísticas (1994). <http://www.sedesol.gob.mx> (Consulta: Agosto, 2007)
- SEGOB (Secretaría de Gobernación). México. <http://www.gobernacion.gob.mx/> (Consulta: Agosto, 2007).
- SEGOB (Secretaría de Gobernación). México. <http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL> (Consulta: Agosto, 2007).
- SOLENA Group. Empresa basada en el estado del arte de la tecnología de plasma produciendo energías renovables. <http://www.solenagroup.com/> (Consulta: Agosto, 2007).
- THERMOSELECT. Empresa Suiza dedicada a la transformación de residuos en gas de síntesis, materias primas minerales y metálicas. <http://www.thermoselect.com> (Consulta: Agosto, 2007).
- WASTE to Energy. Empresa constructora y diseñadora de equipos de gasificación capaces de producir energía a partir de residuos diversos. <http://www.wastetoenergy.co.uk/> (Consulta: Agosto, 2007).