



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

BENEFICIOS ECONÓMICOS, AMBIENTALES Y SOCIALES
ASOCIADOS AL USO DE TECNOLOGÍAS DE
GASIFICACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO

T E S I S

M A N C O M U N A D A

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIEROS QUÍMICOS

P R E S E N T A N

AGUILAR CRUZ ADRIANA NOELLE

CONTRERAS DURÁN JOSÉ JAVIER



MÉXICO, D. F.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dr. Carlos Enrique Escobar Toledo

VOCAL: Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

SECRETARIO: Dr. Alfonso Durán Moreno

1er. SUPLENTE: Ing. Abraham Rodrigo Flores Ramos

2do. SUPLENTE: Dr. José Agustín García Reynoso

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: 4º Piso, Torre de Ingeniería, Ciudad Universitaria

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alfonso Durán Moreno

SUSTENTANTES:

Adriana Noelle Aguilar Cruz

José Javier Contreras Durán



AGRADECIMIENTOS

De Javier:

Le doy gracias a Dios por haber puesto en mi camino a todas esas personas maravillosas e interesantes que he conocido y que me han enseñado que la vida es un mar de contraste en el que puedes nadar y alcanzar cualquier orilla, así como hundirte y salir a flote para descubrir que siempre hay un horizonte al cual tratar de ir.

En primer lugar quiero agradecerle a la persona, que considero, como uno de los pilares principales de mi formación, el cual siempre me alentó a seguir adelante, siempre tuvo hacia mí un consejo, un acto de afecto sincero, un llamado de atención, pero sobre todo mucho amor. Siempre velo por mi y por mi familia y a pesar de que ya no se encuentra entre nosotros yo se que esta observándonos y escuchándonos desde donde quiera que se encuentre, *“Me dijiste gracias tantas veces por haberte ayudado cuando me lo pedías, cuándo tu me ayudaste tantas veces sin pedírtelo, Gracias por tu tiempo, tu fuerza, tu paciencia, tus palabras, tus enseñanzas, pero sobre todo por tu amor, Gracias Papá DonEme”*

A mis padres: Agradezco enormemente en primera instancia que me hayan dado la vida y que hayan peleado ante la vida por mi, gracias por su guía, por su orientación y formación, gracias por sus desvelos, sus lagrimas y sacrificios. De ustedes he aprendido la fortaleza, la templanza, la prudencia, el trabajo y la humildad; me siento muy dichoso por tenerlos a mi lado, por saber que siempre extenderán su mano para que me levante cuando tropiece mi pie en el duro andar de la vida, pero sobre todo soy dichoso por que tengo a *“Los Mejores Padres del Mundo”*, los Amo y este trabajo es para ustedes, Gracias por todo.

A mis hermanos Guillermo, Alfredo, Alan y Yesúa, les agradezco por ser parte de mi vida, sin ustedes a mi vida le hubiesen faltado risas, lagrimas y amor, gracias por su complicidad en las travesuras, en los juegos y en la vida, *¡los adoro chaparros!*

A mis mejores amigos: “Sra. Lourdes”, “Lulu”, Cinthya, Erika, Marcos, Sergio, Patricia, Joel, Daniel, Marisela, Alma, Daniela, Xamán, Paula, Enrique, Juan, Andrés y Raúl, gracias por caminar a mi lado por este proceso llamado vida, gracias por haberme ofrecido su mano, su hombro y su tiempo cuando lo necesite, gracias por ser mis confidentes, mis hermanos, mi refugio pero sobre todo gracias por ser mis mejores amigos.

Luis: Gracias *“Flaco”* por compartir con migo tu tiempo, tu espacio, tus miedos, tus tristezas, tus alegrías, tus emociones, tus palabras y tus pensamientos, gracias por todos esos momentos que tenemos en los que discutimos los temas y sus posibles soluciones, gracias por tus consejos y tus regaños, gracias por ser una pieza importante en mi vida, *“Je t’aimerai tous la vie”*

Adriana: Con alegría recuerdo todos los momentos que hemos pasado juntos, nuestras aventuras, nuestras confianzas, nuestras peleas, nuestras pachangas, pero sobre todo nuestras *“zo.....”*, jeje. Eres parte de mi segunda familia y te estimo demasiado. Gracias por ser parte de este trabajo, que aunque se que no ha sido fácil el camino lo hemos transitado con ahínco, lo que me enorgullece en gran manera, eres una gran persona pero sobre todo una gran amiga. Te quiero y muchas gracias.

Quiero agradecer al Doctor Alfonso Durán Moreno por la ayuda prestada durante la elaboración del presente trabajo pero sobre todo por permitirme ser parte de su espléndido grupo de trabajo, por ser más que un Tutor para mí, un gran Amigo, con el que he podido contar siempre que lo



necesito, gracias por su tiempo, sus consejos y dedicación. Usted es una de las personas que admiro y con la que he crecido mental y profesionalmente, *“GRACIAS MI INCONDICIONAL AMIGO”*

Quiero extender un afectuoso y sincero agradecimiento a la M. Isela J. Martínez Medina, por que fue una guía muy importante en la elaboración de este trabajo. Gracias Isela por que siempre que requerí de tu tiempo me hiciste un espacio, sin importar el mucho trabajo que tenias en ese momento, gracias por tus comentarios, regaños y consejos y muchas gracias porque a tu lado he crecido mucho profesionalmente, *“GRACIAS MI QUERIDA AMIGA”*

Gracias M. Teresa Unda, Dra. Rocío Redón, Dr. Carlos Escobar, Dr. Víctor Luna, Juan Marín, Fernando Gómez, Columba López, Marco Rivera, Rene Rosas, Mauro Aguilar, Sorge Pavel, Enedino Varela, Israel Islas, Alejandro Petrichole, Raúl Miranda, Frantz Blanco, Jonathan Blanco, Akemi Nakazawa, Antonio Ramírez, *“ALDUPRE”*, Carlos Ibarra, Iván García, Eduardo Vera, Oscar Vera, Salvador Espindola y a todas aquellas personas que también han colaborado con sus consejos, tiempo y enseñanzas en mi formación a todos ustedes GRACIAS.

Como no mencionar a mi querida Universidad la *“UNAM”* en donde he pasado la mayor parte de mi vida, la que me ha enseñado, desarrollado y formado, como no mencionar que gracias ella es que estoy hoy aquí, que no ha sido la segunda sino mi primer casa, a ti mi universidad MUCHAS GRACIAS.



De Adriana:

Gracias Padre Celestial por permitirme llegar hasta este momento tan importante en mi vida y lograr una meta más en ella, por darme todo lo que tengo y ser mi fortaleza.

A mis papás cuyo amor, comprensión y paciencia no conocen límites, gracias por su gran apoyo incondicional en todos y cada uno de los días de mi vida, aun en los momentos complicados, por su ejemplo y por enseñarme el camino que debo seguir, los AMO más que a cualquier otra cosa en esta vida; y le agradezco a Dios por ponerlos junto a mí. Este trabajo es para ustedes y por ustedes.

Por estar conmigo, por ser un ejemplo en diferentes situaciones de la vida, por su alegría y ocurrencias, por las peleas de hermanos (jajaja): Set, Priscila, José Luis son unos hermanos geniales, los amo.

A mi segunda familia Gaby, Kary y sus papás, por su amistad, amor y apoyo que me han dado desde que los conozco; a toda mi familia: abuelos, tíos y primos que siempre han estado al tanto de mí y de mi familia. Los amo a todos!

Javier, por que te puedo agradecer???..... por tu paciencia, por soportarme no sólo durante la carrera sino también en el trabajo y mientras duró esta tesis (aunque a veces parecía interminable), porque se que aún después me vas a seguir soportando, por tus consejos buenos y malos, por todos esos momentos de diversión y de reflexión, te quiero muchísimo amigo!!!!!!!!!!!!!!

A mis compañeros de aventuras: Pau y el King los adoro amigos, gracias por su amistad y por los buenos momentos compartidos aquí y al otro lado del Océano Atlántico, Ü.

Xam, Juan Pablo, Andrequique, Rodrigo, Cristian, Adrian, Gabriel, Saúl, Ernesto... gracias por pasarme las tareas, los exámenes, las prácticas de laboratorio,... jajajaja gracias por todo lo que compartimos en la facultad y fuera de ella, por estar siempre en los momentos de alegría y en los momentos tristes, cuando pasábamos, cuando reprobábamos, por los consejos, por las desveladas mensajándonos para terminar las tareas... por todo, los quiero mucho!

Lalo, Oscar, Salvador, Ro, gracias por hacer que mi estancia en la Torre de Ingeniería no fuera aburrida y común, por los momentos de desestres, las charlas, consejos, chistes y demás... gracias por su amistad, los quiero un buen!!!!

Gracias al Dr. Alfonso Durán por darme la oportunidad de trabajar con él y poder realizar este trabajo que permitió cerrar un ciclo en mi vida.

Frantt, Iván, Oscar, Fernando, Juan Carlos, Columba, Ise, Marquito, Ene, Mauro, René, Jesús, Rafaela, Jon, Carlos, Petri, Rulo, Pavel, Belmont, gracias por dejarme aprender con ustedes y de ustedes, en la oficina, en las refinerías, desayunos, comidas, reuniones, pijamadas..., por ser mis amigos más que compañeros de trabajo.

Gracias a la UNAM, esa institución que me ha brindado la oportunidad de crecer y aprender en la ENP. No. 2, en la Facultad de Química, en el CCADET y en la Torre de Ingeniería; me enorgullece el hecho de que forme parte de mi vida. *“Como no te voy a querer, como te voy a querer si mi corazón azul es, y mi piel dorada siempre te querré”*



Y gracias a todas las demás personas que de una u otra manera hicieron posible que pudiera llegar hasta aquí, por sus consejos, enseñanzas y ayudas: mis sinodales (Dr. Escobar y Dr. Luna), la Dra. Rocío Redón y todos los del CCADET, y todos mis profesores y compañeros a lo largo de mi carrera universitaria.



ÍNDICE DE CAPÍTULOS

INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN	5
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS PARTICULARES.....	6
1. PROBLEMÁTICA ACTUAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO	7
2. ALTERNATIVAS ACTUALES PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RSU	35
3. BENEFICIOS DEL USO DE LA GASIFICACIÓN COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RSU EN MÉXICO	77
4. CONCLUSIONES.....	117
5. REFERENCIAS	120
6. ANEXOS	135

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS POR ENTIDAD FEDERATIVA EN EL 2005 (MILES DE TONELADAS).....	12
TABLA 2. NORMATIVIDAD PARA LOS RELLENOS SANITARIOS EN MÉXICO.....	25
TABLA 3. TIPOS DE DIGESTORES ANAEROBIOS (IDAE, 2007)	43
TABLA 4. TIPOS DE INCINERADORES	50
TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE LOS GASIFICADORES	61
TABLA 6. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE TRES TRATAMIENTOS PARA RSU	63
TABLA 7. MATRIZ DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS	71
TABLA 8. VALORES DE IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL	72
TABLA 9. PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS	73
TABLA 10. TECNÓLOGOS DE GASIFICACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE RSU.	78
TABLA 11. COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS TÉRMICAS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RSU, POR ALGUNOS TECNÓLOGOS.....	79
TABLA 12. VALORES REPORTADOS SOBRE EMISIONES A LA ATMÓSFERA PARA DISTINTAS EMPRESAS (MG/NM ³).....	80
TABLA 13. LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES REPORTADOS POR ALGUNOS PAÍSES (MG/NM ³).	81
TABLA 14. CONDICIONES OPERACIONES DE LAS CORRIENTES DE ENTRADA DEL GASIFICADOR.....	84



TABLA 15.	VENTANAS EN DONDE SE MUESTRA LA COMPOSICIÓN Y LAS CONDICIONES DE LAS CORRIENTES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO.....	86
TABLA 16.	COMPOSICIÓN, FLUJO Y PPM DE LA CORRIENTE DE SALIDA DE SYNGAS.....	87
TABLA 17.	CONTRIBUCIÓN DE CADA RUBRO EN EL CAPITAL TOTAL DE INVERSIÓN.....	89
TABLA 18.	CALCULO DEL CAPITAL TOTAL DE INVERSIÓN.....	92
TABLA 19.	COSTOS DE ALGUNAS PLANTAS DE GASIFICACIÓN REPORTADAS Y UNA ESTIMACIÓN DE LA PLANTA PROPUESTA.....	93
TABLA 20.	TABLA COMPARATIVA DE LA DISMINUCIÓN DE RSU CON EL RECICLAJE TOMANDO EN CONSIDERACIÓN LO REPORTADO POR EL INEGI PARA EL AÑO 2005 (35% DE RECICLAJE DEL TOTAL DE RSU).....	95
TABLA 21.	NÚMERO ESTIMADO DE GASIFICADORES REQUERIDOS (CAPACIDAD 720 TON/DÍA) POR ENTIDAD FEDERATIVA PARA VARIOS ESCENARIOS.....	96
TABLA 22.	TIEMPO DE DEGRADACIÓN DE ALGUNOS MATERIALES.....	99
TABLA 23.	POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LOS RSU.....	112
TABLA 24.	GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA AL MES MEDIANTE UN CICLO COMBINADO.....	113
TABLA 25.	CENTRALES ELÉCTRICAS MEDIANTE CICLO COMBINADO EN MÉXICO Y SU CAPACIDAD EFECTIVA.....	114
TABLA 26.	TARIFAS Y RELACIÓN PRECIO-COSTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR SECTOR DE CONSUMO (PESOS/KILOWATT-HORA).....	115
TABLA 27.	AHORRO APROXIMADO POR UNA TONELADA, EN MATERIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA, DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE LOS RSU.....	116
TABLA 28.	GENERACIÓN DE RSU POR TIPO DE BASURA EN MÉXICO (MILES DE TONELADAS).....	146
TABLA 29.	PORCENTAJE DE LOS RSU EN LAS DISTINTAS ZONAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA.....	147
TABLA 30.	NORMAS RELACIONADAS A LA COMPOSICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU EN MÉXICO.....	150
TABLA 31.	DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE RESIDUOS DE ORIGEN DOMICILIARIO, DE COMERCIOS, INDUSTRIALES Y AGRÍCOLAS.....	153
TABLA 32.	DATOS TÍPICOS SOBRE EL ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS COMPONENTES COMBUSTIBLES EN LOS RSU DOMÉSTICOS.....	157
TABLA 33.	COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LOS RSU EN LA ZONA NORTE.....	159
TABLA 34.	COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LOS RSU EN LA ZONA CENTRO.....	159



TABLA 35.	COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LOS RSU EN EL DF	160
TABLA 36.	COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LOS RSU EN LA ZONA SUR	160
TABLA 37.	COMPOSICIONES PARA EL CÁLCULO DE LA FORMULA MÍNIMA DE LOS RSU EN LA ZONA NORTE.....	162
TABLA 38.	FORMULA QUÍMICAS MÍNIMAS CALCULADAS PARA LOS RSU POR ZONA GEOGRÁFICA.....	163
TABLA 39.	CONTENIDO ENERGÉTICO APROXIMADO DE LOS RSU.....	164
TABLA 40.	PODER CALORÍFICO CALCULADO PARA LOS RSU DE LA ZONA NORTE	167
TABLA 41.	PODER CALORÍFICO CALCULADO PAR LOS RSU DE LA ZONA CENTRO.....	167
TABLA 42.	PODER CALORÍFICO CALCULADO PARA LOS RSU DEL DF	168
TABLA 43.	PODER CALORÍFICO CALCULADO PARA LOS RSU DE LA ZONA SUR	168
TABLA 44.	VALORES ESTIMADOS DEL PODER CALORÍFICO DE LOS RSU PARA LAS DISTINTAS ZONAS DE MÉXICO.....	169
TABLA 45.	PROMEDIO DEL PODER CALORÍFICO DE LOS RSU DE LAS DISTINTAS ZONAS.....	170
TABLA 46.	TABLA DE EVALUACIÓN	171
TABLA 47.	PESOS DE RELATIVA IMPORTANCIA.....	174
TABLA 48.	FUNCIONES DE PREFERENCIA.....	177
TABLA 49.	COMPOSICIÓN DEL GAS PROCEDENTE DE GASIFICADORES COMERCIALES DE MADERA Y CARBÓN VEGETAL	197
TABLA 50.	COMPOSICIÓN MEDIA DEL GAS PARA DIVERSOS AGENTES GASIFICANTES	197

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	GENERACIÓN DE RSU, POR PAÍS PARA EL AÑO 2005.....	9
FIGURA 2.	RSU DEPOSITADOS EN RELLENOS SANITARIOS O SITIOS NO CONTROLADOS, POR ENTIDAD FEDERATIVA.	11
FIGURA 3.	RECOLECCIÓN DE RSU POR ENTIDAD FEDERATIVA.	13
FIGURA 4.	GENERACIÓN DE RSU EN MÉXICO DURANTE EL PERIODO DE 1998 A 2005.	17
FIGURA 5.	APORTE DE RSU POR CADA ESTADO DE LA REPÚBLICA MEXICANA.....	17
FIGURA 6.	PRINCIPALES PROCESOS DE DEGRADACIÓN DEL SUELO EN MÉXICO DURANTE EL AÑO 2002.....	27
FIGURA 7.	LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO EN EL EDO. DE MÉXICO.....	29
FIGURA 8.	CONTAMINACIÓN DEL AGUA, POR RESIDUOS ARROJADOS	30



FIGURA 9.	CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR INCENDIOS EN LOS TIRADEROS A CIELO ABIERTO.....	31
FIGURA 10.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	41
FIGURA 11.	IMAGEN DE UNOS DIGESTORES ANAEROBIOS	42
FIGURA 12.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE INCINERACIÓN.....	47
FIGURA 13.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	54
FIGURA 14.	ESQUEMA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	56
FIGURA 15.	ESQUEMA DE LAS ETAPAS DURANTE LA GASIFICACIÓN.....	57
FIGURA 16.	ORDEN PREFERENCIAL PARCIAL.....	74
FIGURA 17.	ORDEN PREFERENCIAL TOTAL	74
FIGURA 18.	PERFILES DE LAS TECNOLOGÍAS	76
FIGURA 19.	PANTALLA EN DONDE SE MUESTRA EL RESULTADO DE LA SIMULACIÓN.	85
FIGURA 20.	COMPARACIÓN ENTRE UN RELLENO SANITARIO Y UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE RSU	100
FIGURA 21.	EJEMPLO DE UNO DE LOS BENEFICIOS AMBIENTALES, CON EL CAMBIO DE HÁBITOS Y COSTUMBRES DE LAS PERSONAS CON LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA GESTIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE RSU EMPLEANDO GASIFICACIÓN.....	102
FIGURA 22.	CONDICIONES DE TRABAJO ACTUAL DENTRO DE LOS RELLENOS SANITARIOS Y CONDICIONES DE TRABAJO EN UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN DE RSU.....	108
FIGURA 23.	INSUMOS, QUE SE PUEDEN OBTENER MEDIANTE EL EMPLEO DE LA GASIFICACIÓN.	111
FIGURA 24.	ESQUEMA EN DONDE SE MUESTRA UN SISTEMA GASIFICACIÓN CON UN CICLO COMBINADO.	113
FIGURA 25.	CICLO DE LOS RSU	135
FIGURA 26.	RECOLECCIÓN POR CONTRATO COLECTIVO DE TRABAJO.....	139
FIGURA 27.	COMPOSICIÓN DE LOS RSU EN MÉXICO DURANTE EL AÑO 2005.....	145
FIGURA 28.	REPRESENTACIÓN DE LA GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS POR ZONA REGIONAL.....	148
FIGURA 29.	INCREMENTO DE LOS DIFERENTES COMPONENTES DE LOS RSU EN EL PERIODO DE 1995 A 2005.....	149
FIGURA 30.	ALGORITMO DE CÁLCULO PARA OBTENER LA COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LOS RSU	158
FIGURA 31.	ALGORITMO DE CÁLCULO PARA OBTENER LA COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LOS RSU POR ZONA GEOGRÁFICA.....	161



FIGURA 32.	ALGORITMO DE CÁLCULO DE LA RELACIÓN MÍNIMA QUE TIENE EL N Y EL S EN LA COMPOSICIÓN DE LOS RSU POR ZONA GEOGRÁFICA.....	162
FIGURA 33.	REPRESENTACIÓN DEL VALOR DE PODER CALORÍFICO POR ZONA DE LA REPÚBLICA.....	169
FIGURA 34.	RELACIONES DE DOMINANCIA	172
FIGURA 35.	FUNCIÓN DE PREFERENCIA.....	176
FIGURA 36.	GRAFICO DE ÍNDICES DE PREFERENCIAS AGREGADAS.....	180
FIGURA 37.	FLUJOS DE CATEGORÍAS DE PROMETHEE.....	181
FIGURA 38.	RELACIONES DE PROMETHEE I.....	182
FIGURA 39.	PERFIL DE UNA ALTERNATIVA.....	184
FIGURA 40.	VENTANA PRINCIPAL.....	185
FIGURA 41.	RESULTADOS DE ANÁLISIS DE UN PROBLEMA.....	186
FIGURA 42.	ESQUEMA DE UN GASIFICADOR CONCURRENTES	188
FIGURA 43.	ESQUEMA DE UN GASIFICADOR A CONTRACORRIENTE.....	190
FIGURA 44.	ESQUEMA DE UN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO.....	192
FIGURA 45.	GASIFICADOR DE ANTORCHAS DE PLASMA.....	195
FIGURA 46.	RELACIÓN DE LA TEMPERATURA CON LA COMPOSICIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS.....	199
FIGURA 47.	COMPOSICIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS PARA VARIOS VALORES DE PRESIÓN.....	200



INTRODUCCIÓN

El índice de crecimiento demográfico e industrial de México (según estadísticas), ha ido elevándose considerablemente con el paso de los años. En búsqueda de una mejor calidad de vida para los individuos, trayendo como consecuencia el uso irracional de productos no fácilmente degradables, es casi imposible hoy en día detener la generación de RSU que no son aprovechables. De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), en el 2005 existía una población total en la República Mexicana de 103,263,388 habitantes, con una tasa de crecimiento del 1.0%. Si se toma en cuenta que se estima una tasa de crecimiento poblacional del 2005 al 2010 del 1.5%, es posible darse una idea de cuál será el tamaño de la población para ese año y la cantidad de RSU a generarse.

En México, en el año 2005 se produjeron 31 millones 867 mil toneladas en promedio de RSU (INEGI, 2005). Actualmente, no se cuenta con una cultura ambiental lo suficientemente sólida para que cada individuo sea responsable de los RSU que genera, por lo que la responsabilidad de su manejo, recae en los municipios, ya que de acuerdo a lo establecido en el Artículo 115 Constitucional, es responsabilidad de los municipios todos los servicios relacionados con el manejo y disposición final de los RSU; así entonces los municipios tienen la facultad de optar por la prestación directa de los servicios con personal y recursos propios o concesionar a particulares dichos servicios. Frecuentemente los municipios no están preparados para enfrentar ésta tarea; a pesar de que en los últimos años se han logrado mejoras considerables en materia de manejo de RSU, una gran cantidad de ellos continúa arrojándose de manera clandestina y sin control. Actualmente los RSU, en muchos municipios, son depositados en basureros (tiraderos a cielo abierto) y en el mejor de los casos en rellenos



sanitarios, que en su gran mayoría tienen una vida útil no mayor a los 5 años y que, evidentemente, ya no representan una solución factible a largo plazo.

La presión que la población ejerce de manera directa o indirecta sobre el ambiente ha sido de tal magnitud que sus efectos se reflejan claramente en la degradación de suelos, en la pérdida de ecosistemas y en la disminución de la calidad del agua y del aire. Hasta ahora, el balance en el país no ha sido positivo: distintas zonas urbanas del país tienen problemas de calidad del aire, una fracción importante de los ríos y lagos muestran problemas de contaminación y el manejo adecuado de los RSU resulta aún insuficiente (ILAC, 2005). Es en éste rubro en el que se presenta uno de los mayores problemas en materia ambiental que enfrenta México actualmente; en muchas localidades de nuestro país, la logística operacional y/o capacidad de la misma para el manejo y disposición de RSU es deficiente; los RSU no son colectados de forma adecuada y a tiempo.

En lo que se refiere a los sitios de disposición final para los RSU, los tiraderos a cielo abierto y los rellenos sanitarios son los más recurridos en el país, además de estos sitios, existen los lugares clandestinos de disposición final de los RSU, como barrancas, canales, ríos y mares. La existencia de este tipo de prácticas causan problemas ambientales, debido a que los sitios son alterados provocando problemas ambientales (contaminación del sitio), sociales (problemas de salud) y operativos (muchos de los RSU que son arrojados a canales y ríos llegan a provocar problemas hidráulicos como son la generación de tapones debido a la presencia de desechos). Cabe señalar que los RSU no siempre son depositados en sitios específicos, si no son quemados provocando graves problemas ambientales.



Los sitios de disposición final llegan a contaminar el suelo, el agua y el aire; provocando cambios en las condiciones originales del sitio. La capa vegetal originaria de la zona se ve afectada por la presencia de RSU en ella; con la degradación de los RSU, se generan sustancias que alteran la composición química del suelo, así como los ecosistemas involucrados. La misma alteración provocada por la presencia de RSU, en la mayoría de los casos conlleva a una erosión constante del suelo. La atmósfera se ve contaminada con sustancias y microorganismos, provenientes de los RSU, que debido al viento quedan suspendidos en ella; con el tiempo, parte de dichos microorganismos, se descompone y da lugar a nuevos componentes químicos que provocan que el suelo sufra alteraciones. Los sitios de disposición final con un mal manejo de RSU, así como los sitios clandestinos en donde son colocados los RSU, llegan a contaminar las fuentes de agua superficial y/o subterráneas cercanas a ellos, ya que debido a la descomposición de los RSU, se generan componentes líquidos (lixiviados), que son fácilmente arrastrados por la acción de la lluvia o corrientes de agua.

Casi siempre todos los problemas anteriores están relacionados con el aspecto económico y la falta de interés de parte de la población. La mayoría de la población ve los RSU como material sin ningún valor comercial, por lo que la gente paga para deshacerse de ellos. Las condiciones económicas en México han limitado en gran manera la asignación de recursos federales destinados a financiar el servicio de limpia, por lo que no se han desarrollado sistemas integrales para el manejo, tratamiento y disposición final de los RSU, que ayuden a disminuir o controlar la problemática asociada a los mismos.

Sin embargo actualmente se están desarrollando tecnologías que pretenden no sólo disminuir el volumen de RSU que se generan, sino cumplir con la



normatividad establecida que cambia de forma constante y que debe de ajustarse a los nuevos requerimientos regulatorios de tipo ambiental. Adicionalmente, es posible obtener beneficios económicos del manejo y tratamiento de los RSU. Naturalmente la consideración ambiental debe transitar hacia procesos limpios como ciclos cerrados, que abarquen desde el ámbito doméstico hasta el industrial, donde se supriman los RSU. Ésta es una meta importante de la humanidad; por esto algunos países desarrollados invierten recursos en avanzar hacia ella o visto de otra manera, consideran que la degradación del ambiente tiene un costo y por lo tanto es justificable el invertir en procesos que eliminen los residuos o al menos los reduzcan. En países más desarrollados económica y tecnológicamente como lo son los países europeos, Estados Unidos y Canadá, se han desarrollado sistemas de Gasificación para el tratamiento de los RSU. Estas tecnologías ofrecen las ventajas de poder reducir el volumen de los RSU, así como el de generar productos de mayor interés industrial (gases combustibles).

El principio fundamental de dichos procesos es la descomposición térmica de la materia orgánica o los sustratos carbonosos. La acción de un gas que reacciona principalmente con el residuo carbonoso resultante, genera un gas combustible de bajo poder calorífico mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno y/o vapor de agua); el gas obtenido puede ser aprovechado como combustible o como materia prima para la producción de otros compuestos químicos. Existe una gran variedad de tecnologías de gasificación, sin embargo no todas son apropiadas para el tratamiento de los RSU, por lo que se debe de realizar un análisis previo considerando las propiedades y características de los RSU.



JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de Tesis, se desarrolló con el fin de realizar una contribución al entendimiento y resolución de los problemas que actualmente se tienen en varios de los estados de la República Mexicana, en materia de disposición final de los RSU. La mayor problemática en materia de RSU en México se refiere al hecho de que la capacidad de los rellenos sanitarios o los tiraderos a cielo abierto a sido superada; estos a su vez no pueden ser ampliados, por las cercanías con zonas urbanas, generándose problemas de disponibilidad de espacio, entre muchos otros.

Este trabajo plantea la posibilidad de la reducción de los RSU, mediante una tecnología denominada “Gasificación”; este tipo de tecnología, presenta varios beneficios, siendo el beneficio principal para este trabajo, la reducción del volumen de los RSU, con un impacto ambiental mínimo además de la generación de energía eléctrica.



OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal es plantear una solución a la problemática que actualmente se presenta en el país en materia de tratamiento y disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), tomando en cuenta los factores sociales, ambientales y económicos en México.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Proporcionar una visión general de la problemática que actualmente enfrenta México, con respecto a la generación, tratamiento y disposición final de los RSU.
- Analizar las ventajas y desventajas de algunas de las tecnologías que actualmente existen para el tratamiento y disposición final de los RSU.
- Analizar la tecnología de gasificación como opción al tratamiento y disposición final de los RSU.
- Mostrar los beneficios ambientales, sociales y económicos de la implementación de la tecnología de gasificación como solución al problema de los RSU en nuestro país.



1. PROBLEMÁTICA ACTUAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO

De acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003), se le denomina residuo al material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final.

Los residuos pueden clasificarse en Residuos de Manejo Especial, Residuos Incompatibles, Residuos Peligrosos y Residuos Sólidos Urbanos.

- Los 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 Incompatibles: son aquellos que al entrar en contacto o al ser mezclados con agua u otros materiales o residuos, reaccionan produciendo calor, presión, fuego, partículas, gases o vapores dañinos.
- Los Residuos Peligrosos: son aquellos que poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contenga agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieren a otro sitio.



-
- Los Residuos Sólidos Urbanos (anteriormente llamados Residuos Sólidos Municipales en la Legislación Constitucional), son los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas, de los productos que se 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 misma Ley como residuos de otra índole.

En nuestro país, durante el 2005, se generaron 35,383 mil toneladas de RSU (INEGI, 2007), que como se puede observar en la Figura 1, a nivel internacional, según la “Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)”, corresponden al 4º lugar mundial, en referencia a los países pertenecientes a ésta organización, mientras que el primer lugar es para los Estados Unidos (OECD, 2007).

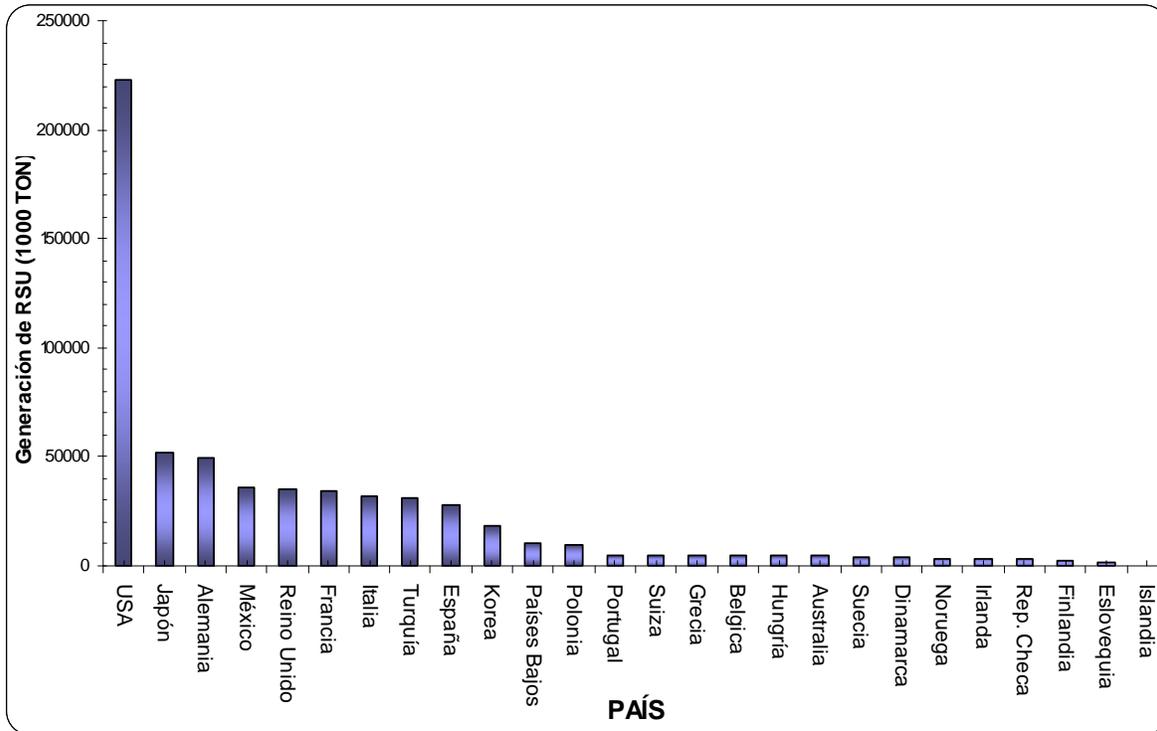


Figura 1. Generación de RSU, por país para el año 2005.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la OECD

Estos residuos deben de ser manejados, tratados y finalmente depositados en algún lugar adecuado para su disposición final; por desgracia no siempre se llevan a cabo correctamente éstas acciones. Se estima que del total de los residuos generados el 23% de éstos no son recolectados o se depositan en tiraderos clandestinos, en baldíos, cuerpos de agua o en calles, lo que ocasiona problemas de contaminación, de salud pública y de obstrucción o mal funcionamiento de los sistemas de drenaje y alcantarillado, provocando enfermedades gastrointestinales, presencia de fauna nociva y en algunas ocasiones el desborde de canales de aguas negras e inundaciones.

Las poblaciones idealmente deben de contar, con el servicio de limpia, que consta de las etapas de: barrido de vías y áreas públicas, recolección, transporte,



tratamiento y disposición final (véase Anexo 6.1); al conjunto de éstas etapas se les da el nombre de “Ciclo de los RSU”, sin que éste sea precisamente un ciclo.

En la actualidad los RSU son designados principalmente a Rellenos Sanitarios y Rellenos de Tierra Controlados, ya que son consideradas como las opciones más “económicas y fáciles de controlar”, sin embargo no siempre esto se cumple, ya que muchos de los lugares que actualmente se asignan para este tipo de lugares, no cuentan con las medidas necesarias para su operación. Cerca de 50% de los residuos generados se deposita en tiraderos a cielo abierto o en rellenos no controlados que no cumplen con los requisitos técnicos para su adecuada disposición, lo que propicia riesgos a la salud de la población, a los ecosistemas y en general, reduce la calidad de vida de las poblaciones (INEGI, 2005).

Por lo que actualmente es en ésta última etapa del ciclo (disposición final) en la que México enfrenta graves problemas, ya que aún en pleno siglo XXI, los lugares de disposición final que se emplean, presentan un alto grado de contaminación ambiental, debido a que muchos de estos lugares no cuentan con medidas de impacto ambiental adecuadas para su instalación. El que este tipo de sitios no estén controlados, presenta un alto riesgo para la población y el medio ambiente.

Según el INEGI, en el 2005, en el país existían 118 lugares de entierro (95 rellenos sanitarios y 23 rellenos de tierra controlados), sin embargo hasta esa fecha no se tiene información de cuantos sitios no controlados se encuentran en el país, pero se conoce que llegan a depositarse hasta 11,337.3 mil toneladas de RSU en estos lugares (En la Figura 2, se muestra dicho comportamiento).

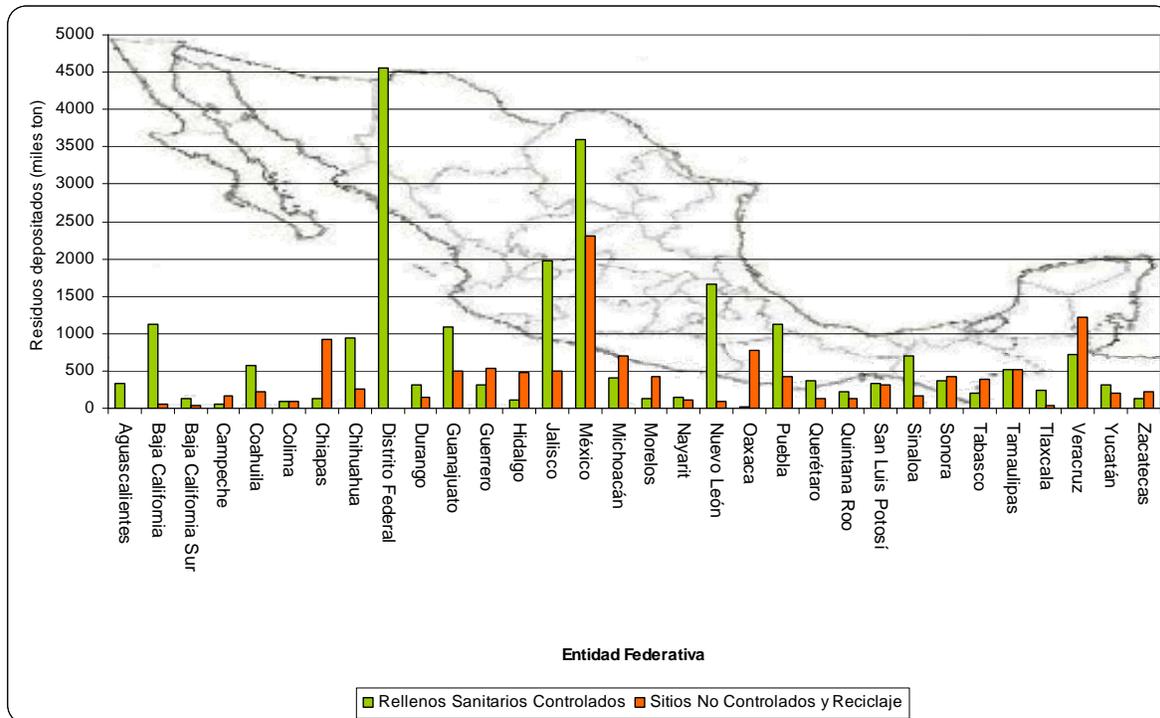


Figura 2. RSU depositados en rellenos sanitarios o sitios no controlados, por entidad federativa.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DATOS INEGI 2005

Dentro de la problemática que presentan los sitios de disposición final, se encuentra, la capacidad de manejo de RSU de estos lugares, debido a la gran cantidad de RSU que se generan actualmente en varias partes del país, la capacidad de los sitios de disposición final se ve rebasada, o a punto de ser cubierta; éste problema es debido a la lenta degradación de los materiales que conforman los RSU, a la mal planeación de los sitios y al mal manejo de los mismos. En la Tabla 1 se puede apreciar la cantidad de RSU que se generan por entidad federativa en nuestro país, lo que ayuda a visualizar el volumen de los mismos que es necesario tratar por cada Estado del país.



Tabla 1. Generación de residuos sólidos urbanos por entidad federativa en el 2005 (Miles de toneladas)

Entidad federativa	En el año 2005 (Miles de ton)	Porcentaje (%)
Estados Unidos Mexicanos	35383	100
Aguascalientes	327	0,9
Baja California	1175	3,3
Baja California Sur	168	0,5
Campeche	224	0,6
Coahuila de Zaragoza	801	2,3
Colima	177	0,5
Chiapas	1053	3,0
Chihuahua	1199	3,4
Distrito Federal	4550	12,9
Durango	456	1,3
Guanajuato	1584	4,5
Guerrero	858	2,4
Hidalgo	586	1,7
Jalisco	2482	7,0
México	5902	16,7
Michoacán de Ocampo	1091	3,1
Morelos	538	1,5
Nayarit	265	0,7
Nuevo León	1752	5,0
Oaxaca	792	2,2
Puebla	1548	4,4
Querétaro Arteaga	504	1,4
Quintana Roo	352	1,0
San Luis Potosí	646	1,8
Sinaloa	872	2,5
Sonora	785	2,2
Tabasco	602	1,7
Tamaulipas	1038	2,9
Tlaxcala	272	0,8
Veracruz de I. de la Llave	1927	5,4
Yucatán	509	1,4
Zacatecas	347	1,0

FUENTE: INEGI ,2005

En la Figura 3 se presentan de manera gráfica, estos valores, con el propósito de visualizar mejor ésta situación. Se aprecia que en los estados en los que la



densidad poblacional es muy elevada, así como en los que presentan un grado de industrialización más grande, es en donde se genera una gran cantidad de RSU (El DF, el Edo. De México, Jalisco, entre otros).

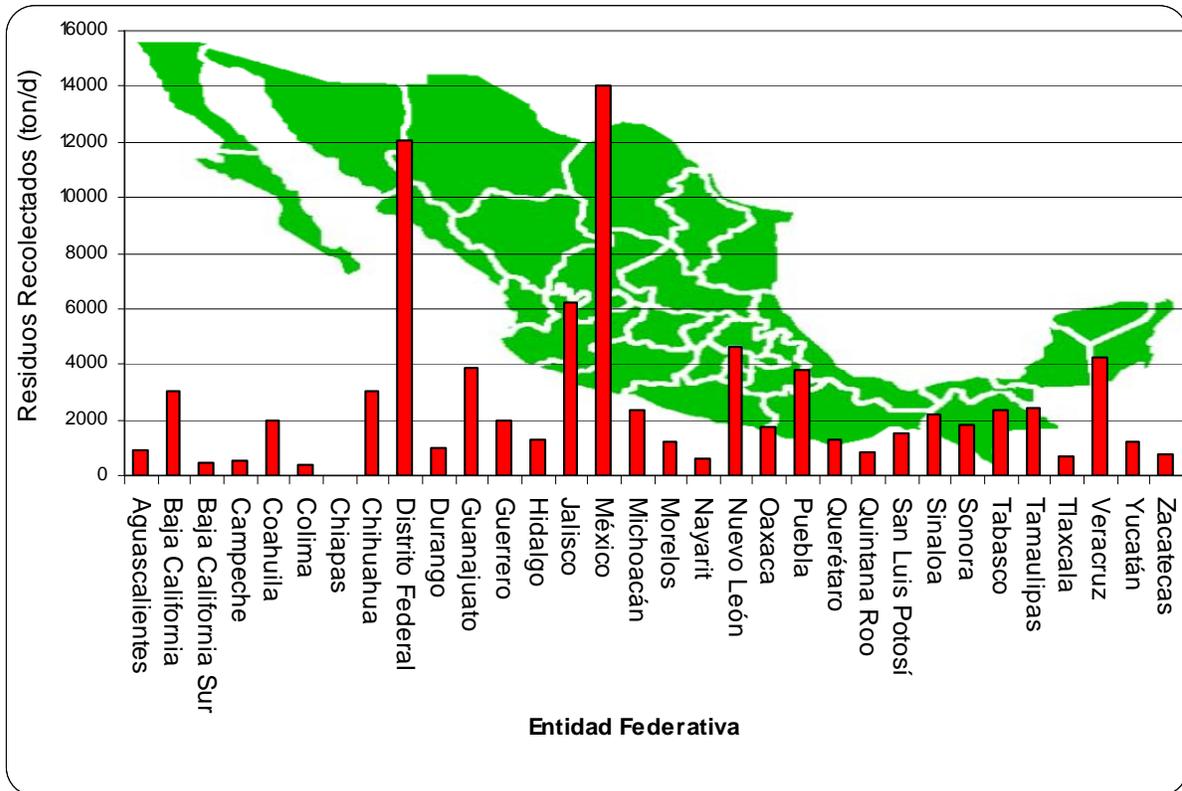


Figura 3. Recolección de RSU por entidad federativa.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DATOS INEGI 2005

Para tener un mejor entendimiento de la cantidad de RSU que se generan en nuestro país y del problema, se presenta el siguiente ejemplo:

Considere que en la Ciudad de México, se están generando alrededor de tres millones de metros cúbicos al mes y en el país alrededor de diez millones de metros cúbicos y en el mundo mil millones de metros cúbicos, si se dice que el



Estadio Azteca de la Ciudad de México, tiene una capacidad de un millón de metros cúbicos, quiere decir que solamente en el Valle de México deberíamos de excavar tres cráteres del tamaño del estadio Azteca, para poder enterrar este volumen de basura. No existe el espacio disponible, ni los recursos económicos y humanos para poder llevar a cabo esto; y si los hubiera, serían un gran desperdicio de orden económico y humano.¹

Así, es posible dimensionar la existencia de una gran cantidad de RSU en tiraderos a cielo abierto, en barrancas, ríos, lagos, alcantarillado, calles, parques o incluso hasta en los mares, dando como resultado el deterioro de los recursos naturales. La generación de RSU sigue en general, el ritmo marcado por el consumo nacional privado y el Producto Interno Bruto (PIB): mientras más se gasta mayor generación de RSU se producen.

La falta de sitios adecuados para el confinamiento de los RSU (es decir de los llamados rellenos sanitarios), así como el agotamiento de su capacidad y la ineficiencia en su manejo pueden traducirse en potenciales riesgos para la población por los efectos negativos a la salud y el ambiente que traen consigo. Entre éstos destacan la contaminación del aire, del suelo y aguas superficiales y subterráneas; la generación de biogás (con el respectivo riesgo por su toxicidad y explosividad), la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y el deterioro estético de los centros urbanos y del paisaje natural (ILAC, 2005).

Tomando en cuenta todo lo anterior se tienen algunas consideraciones promedio que se utilizan para el cálculo de inversiones en materia de disposición final de los

¹ Unión de Grupos Ambientalistas I.A.P



RSU en un relleno sanitario, que generan un panorama general de la situación que se tiene en materia de manejo de RSU en nuestro país²:

- Un camión de carga trasera por cada 15.3 m³ o 6.9 ton/viaje
- Los camiones de volteo atienden el 8% de los residuos generados por las localidades
- Una eficiencia de 2 viajes por día en promedio por vehículo
- Una barredora mecánica cada 1000,000 habitantes
- Un contenedor de 6 m³ por cada 12,500 habitantes
- Una estación de transferencia con generadores entre 500 y 100 ton/día
- 1,200 m² de terreno y 900 m² de construcción para la estación de transferencia
- 0.12 ha. Por tonelada generada al día para la construcción del relleno sanitario con una vida útil de 10 años
- Un cargador frontal por cada 300 toneladas de manejo diario de residuos
- Un compactador por cada 600 toneladas de manejo diario de residuos

² SEMARNAP, 1997; "Estadísticas e indicadores de inversión sobre residuos sólidos municipales en los principales centros de México".



1.1. Problemática social

Aún en pleno siglo XXI el manejo y la disposición final de los RSU en muchos países es un problema, ya que existe una creciente generación de los mismos debido al crecimiento de la población y al cambio de hábitos de la sociedad en general; nuestro país no es una excepción. De acuerdo a datos del INEGI en el 2005 había una población aproximada de 103,263,388 habitantes, generándose en promedio, alrededor de 35,383,000 toneladas de RSU.

La constante generación de RSU es un fuerte problema en México ya que se ubica como el onceavo país más poblado del mundo (BANCO MUNDIAL, 2007), y que en él se generan en promedio 0.876kg de RSU por habitante por día, de los cuales actualmente se estima que se recolectan únicamente el 88.4% del total de los RSU generados y casi el 60% de éstos, se deposita en forma adecuada (sitios controlados y rellenos sanitarios).

Conforme la población en el país va aumentando, la generación de RSU se incrementa de forma casi proporcional. En la Figura 4, se muestra la generación de RSU a través del tiempo en el periodo del año 1998 al 2005. La Figura 5, muestra cual es la distribución de generación de RSU por zona en nuestro país.

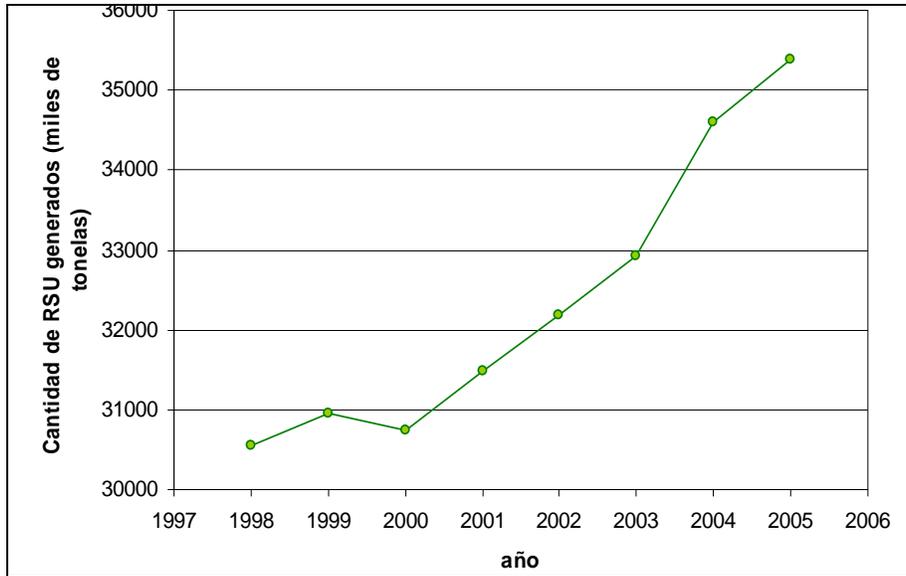


Figura 4. Generación de RSU en México durante el periodo de 1998 a 2005.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DATOS INEGI 2005

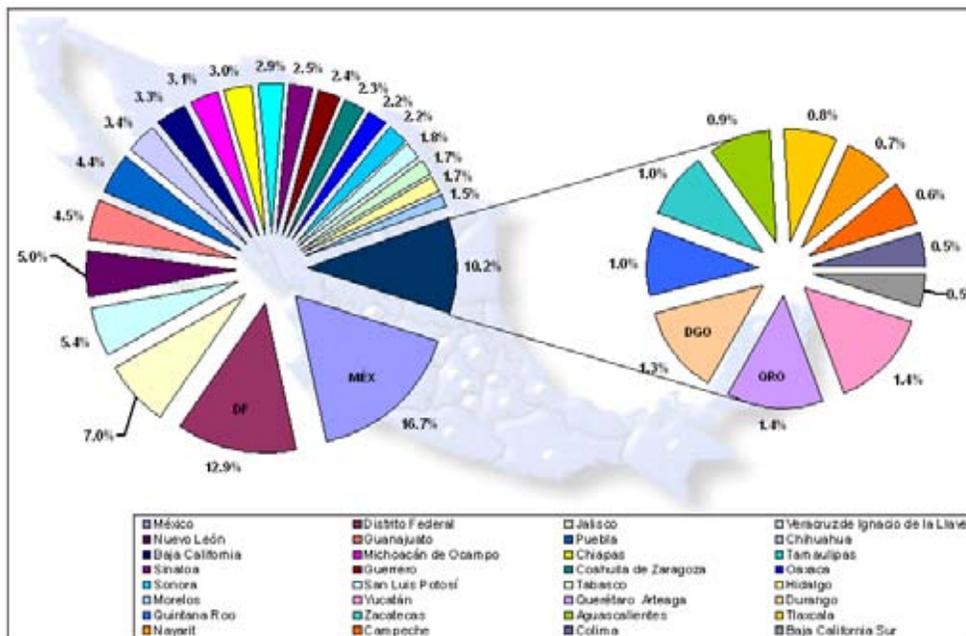


Figura 5. Aporte de RSU por cada Estado de la República Mexicana.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DATOS INEGI 2005



Por otro lado, la cobertura de recolección promedio a nivel nacional en la población que tiene disponible el servicio, se estima en 83%, mientras que en las zonas metropolitanas, se ha calculado un 95%, mayor que para las ciudades medianas, donde el valor se encuentra entre el 75 y 85%. Para el caso de los municipios en los cuales la densidad demográfica no es muy alta, el sistema de recolección de los residuos es nulo o precario, lo que da como resultado una grave problemática, ya que los RSU son arrojados a los ríos, a las barrancas o en su defecto, son quemados sin ninguna prevención (INE, 2007).

El problema de los RSU ha sido estudiado por distintos autores, sin embargo en distintos niveles gubernamentales, se reconoce el rezago existente en nuestro país para tratar los RSU que se depositan diariamente, al igual que los problemas de salud que estos generan en la población. También es notorio el incremento constante de los costos de operación para su manejo y por lo tanto, la insuficiencia de los presupuestos para tal fin, aunado a esto se observa un rezago en la infraestructura para el manejo y la disposición final de por lo menos 50 años.

1.1.1 Problemática social asociada a Legislación actual en materia de RSU

La Normatividad Mexicana existente, está dirigida principalmente a la etapa final de disposición de los RSU, mientras que para las etapas de recolección, reciclaje o minimización no existe alguna, lo que conlleva a buscar soluciones integrales a la problemática de los RSU.

El marco legal bajo el cual se sustenta el manejo integral de los RSU, incluye Leyes, Reglamentos y Normas de los tres órdenes de gobierno, como son: Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Ley General de Salud, Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Ley de Residuos



Sólidos del Distrito federal, Normas Oficiales Mexicanas y Normas Técnicas Mexicanas, Constitución Política Estatal, Ley Estatal de Protección al Ambiente, Ley Orgánica del Municipio Libre de Policía y Buen Gobierno y en algunos casos Reglamento de Limpia.

La problemática social es uno de los factores más relevantes para la operación exitosa de los programas integrales de manejo de los RSU, ya que en muchas ocasiones existen un gran número de soluciones técnicas al problema de la disposición de los RSU, las cuales, sin embargo desde, el punto de vista social, no toman en cuenta la opinión de la población.

Debido a la irresponsabilidad social y gubernamental que existe en nuestro país, la mayoría de los RSU son depositados en lugares que no cumplen las normas básicas de saneamiento o que ni siquiera están destinados para ello. Aunado a esto, la falta de educación en materia ambiental (tanto la impartida en el núcleo familiar como a un nivel escolar), provoca las malas e inadecuadas prácticas de disposición de los RSU, tanto por parte de la comunidad como algunas veces por parte del gobierno.

Uno de los grandes problemas es que no se ha creado una estrategia integral de manejo de los RSU, así como ha existido poco interés de parte del gobierno en la creación de organismos encargados de la reutilización o confinamiento adecuado de los residuos. Asimismo, no existe una conciencia del posible valor económico agregado a los RSU. Por el contrario, las medidas adoptadas para el control de los RSU sólo han buscado solucionar el problema encontrando lugares para su disposición final y ampliando la recolección; paralelamente se han considerado poco las prácticas para reducir los volúmenes de RSU, así como implementar procesos productivos con tecnología más limpia y procesos que generen menos cantidades de éstos.



1.1.2 Problemática social asociada a la salud

Los efectos directos a la salud, son aquellos en los que los RSU producen condiciones inadecuadas para la vida, al degradar al ambiente, aumentando la cantidad de agentes patógenos, es decir, de microorganismos causantes de enfermedades, así como la presencia de materias tóxicas que pueden generar gases que ocasionan daños a la piel, las vías respiratorias, irritación en los ojos y alergias, sin mencionar los efectos repulsivos a la vista y el olfato. Los efectos indirectos, se dan por la deposición inadecuada y desordenada de los RSU que resulta un buen hábitat para plagas, al brindarles fuentes estables de alimento y condiciones de vida a ratas, mosquitos, cucarachas, moscas y otros insectos, que transmiten al ser humano enfermedades gastrointestinales, respiratorias (laringitis y faringitis) y micóticas (generadas por hongos) tales como: peste bubónica, tifus, rabia, disentería, enfermedades del tracto digestivo, fiebre amarilla, dengue, encefalitis, tuberculosis, leptospirosis y otras.

Los principales focos de infección y proliferación de plagas son:

- La acumulación de RSU en la casa, la escuela, los terrenos baldíos, las calles, los drenajes y los tiraderos, trae como resultado sitios insalubres, debido a que los desechos se encuentran mezclados (orgánicos e inorgánicos) y cuando comienza su descomposición, proliferan hongos, bacterias y muchos otros microorganismos causantes de focos de infección que pueden provocar serías complicaciones a la salud.
- La acumulación de RSU al aire libre es un ambiente propicio para la proliferación de organismos tales como ratas, cucarachas, moscas,



mosquitos, entre otros que pueden transmitir enfermedades a lugares cercanos.

La descomposición de los RSU, genera un gas, el cual es una mezcla de otros gases que incluyen el metano, el dióxido de carbono y otros compuestos orgánicos no metálicos. Muchas de estas sustancias son tóxicas o cancerígenas como es el caso de las dioxinas y los furanos, producidos por la incineración de los compuestos plásticos.

Los peligros para la salud no terminan allí. Los líquidos resultantes del proceso de disolución de los metales por efecto de la lluvia y de agentes químicos o biológicos, contienen altos niveles de plomo, cadmio, arsénico y níquel. La exposición a estos metales puede provocar enfermedades de la sangre y los huesos, así como daños en el hígado, reducción de las capacidades mentales y daños neurológicos. También se han encontrado compuestos orgánicos volátiles, como benceno y clorobencenos, tricloroetileno, xileno, cloruro de vinilo y tolueno. La exposición a estos compuestos ha sido asociada con el cáncer, la leucemia y los daños neuronales y hepáticos.



1.1.3 Problemática social asociada a los sitios de disposición final

Para el 2004, el Gobierno del Distrito Federal contaba con 2,000 camiones de recolección, aproximadamente funcionaban 1,700, los cuales tienen asignados igual número de chóferes y aproximadamente 3,400 ayudantes y 4,000 voluntarios, además de 8,000 barrenderos. Esto quiere decir que esta actividad mantiene directamente a 17,100 individuos, resultando beneficiadas en conjunto un promedio de 83,500 personas, que dependen económicamente del servicio de recolección de basura únicamente en el DF. Esto es sólo el lado formal de la historia en cuanto al empleo en el medio de los RSU; del otro lado la realidad es incierta, con ausencia de calidad de vida e incluso muy injusta en el reparto de las ganancias que generan.

De lo anterior se deriva otro de los problemas frecuentes en este rubro. En el proceso del manejo de los RSU, se ven involucradas varias personas que no pertenecen al sector formal de la gestión de los RSU, este es el círculo vicioso que existe por parte de la recolección y confinamiento, donde existen ciertos sindicatos o grupos organizados de pepena; este sector "informal" se presenta en todos los países siendo considerada la actividad que desarrollan los pobres, que pepenan los materiales en los basureros de los municipios.

En el 2001 se estimó que existían entre 25 o 30 mil pepenadores en los tiraderos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Entre ellos hay niños, ancianos, campesinos emigrados, ex-convictos y principalmente familias que no desean trabajar en fábricas debido a que consiguen un ingreso mayor en la pepena del que podrían ganar en el sector formal.

En la Ciudad de México existen tres organizaciones de los pepenadores:



-
- San Juan de Aragón: Asociación de Selectores de Desechos Sólidos de la Metrópoli A.C.
 - Bordo Poniente: Frente Único de Pepenadores A.C.
 - Santa Catarina: Unión de Pepenadores del DF Rafael Gutiérrez Moreno A.C.

La organización de los pepenadores en México, data de hace tiempo, y el agente principal de esta organización recae en el denominado “líder”, el caso más sobresaliente en la historia de México es la del fallecido Rafael Gutiérrez Moreno. El líder de los pepenadores es el que controla el proceso de comercialización y mantiene la forma de distribución de los rendimientos económicos y del funcionamiento de la disposición final. Las organizaciones que comanda el líder aparentemente operan como cooperativas, sin embargo no lo son, ya que los pepenadores no son socios y los beneficios no se distribuyen como en una cooperativa. Se trata de una empresa privada informal, que prácticamente es propiedad del líder y su entorno, no paga impuestos, ni cotiza para el pago de beneficios sociales de su personal.

Existen varios factores que inciden en las condiciones deplorables de los pepenadores, uno es el caciquismo que se ejerce sobre ellos; los caciques por medio de ayudantes incondicionales organizan a los sectores informales, imponen su voluntad y reciben innumerables beneficios económicos procedentes del cacicazgo. En esta distribución, el líder y sus ayudantes, nombrados “cabos”, concentran para sí una parte importante de los beneficios. Como ya se ha mencionado los líderes son los que se encargan del pago del trabajo de los pepenadores, ellos son los que controlan las tarifas a pagar por los diferentes materiales que se pepenan en los tiraderos; generalmente los pepenadores se ven explotados, por las personas que compran el material, ya que la cantidad que les pagan por la venta de los RSU recolectados es muy baja, llegando a recibir \$50 o



\$60 pesos M.N. Esta situación propicia que estas personas vivan en condiciones de suma pobreza.

Considerando esta situación la gestión de los RSU en México no funcionaría hasta que no se prevea un cambio fuerte de las estructuras actuales en este sector. En el pasado hubo tentativas de incorporar a los pepenadores a las estructuras formales, sin embargo, no ha tenido éxito debido a que generalmente se ofrecen trabajos de barrido por un sueldo mínimo, mientras que el ingreso por la separación informal es de dos a tres sueldos mínimos. Por esta razón, las personas no aceptan las ofertas y si es necesario van a otros lugares de disposición, donde esta forma de trabajo todavía es tolerada.

Es importante que en la estrategia para implementar sistemas de Gestión Integral de RSU incorpore a este sector, buscando soluciones que permitan a los pepenadores continuar con su trabajo, pero en condiciones que ayuden a reducir los impactos negativos el medio ambiente. Ejemplo de esto es que cuando se construyen estaciones de transferencia en los sitios de disposición final, como es el caso de Santa María Chiconautlá. Edo. de México, no son puestas en marcha, generando grandes pérdidas de inversión, así como un rezago en el manejo eficiente de los RSU. Las causas que originan estas acciones se deben principalmente a que la gente que trabaja en la pepena tiene miedo de perder el único ingreso que tienen y el único trabajo que conocen, ya que carecen de estudios, que les puedan ayudar para conseguir otro trabajo.



1.2. Problemática ambiental

El problema comienza desde el manejo inadecuado en la recolección de los RSU. Los camiones o vehículos destinados para este fin, se encuentran en mal estado, provocando que el servicio que prestan sea deficiente. Los contenedores de estos camiones no son diseñados para cubrir las necesidades de capacidad para transportar los RSU; además de que no se les brinda el mantenimiento adecuado y constante para el tipo de desperdicios que manejan. Esto provoca que se observe la dispersión de los RSU por las calles y carreteras donde transitan éstos, provocando focos de infección.

El problema continúa en los sitios de disposición final (rellenos sanitarios, tiraderos a cielo abierto o tiraderos clandestinos), ya que regularmente no cumplen con las especificaciones mínimas requeridas de acuerdo a los estatutos establecidos en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente así como en la Normatividad vigente (Tabla 2). Esta situación se agrava cuando no existe la infraestructura mínima necesaria para su correcta operación, provocando que no se traten adecuadamente los lixiviados generados por la descomposición de los propios RSU, así como el biogás producido por su degradación. Con lo anterior se producen problemas de contaminación tanto del suelo, del agua y del aire.

Tabla 2. Normatividad para los rellenos sanitarios en México.

NORMA	TEMA
NOM-083-SEMARNAT-2003	Establece las especificaciones para la selección de sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y otros concernientes a sitios de disposición final de RSU y de manejo especial.
NMX-AA-15, 16, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 33, 52, 61, 67, 68, 92	Establecen los lineamientos para la caracterización de los RSU



1.2.1 Contaminación del Suelo

El suelo constituye uno de los elementos más importantes del medio ambiente; ya que mantiene complejas interacciones dinámicas con la atmósfera y el subsuelo, permitiendo el mantenimiento de los servicios ambientales de los ecosistemas e influyendo en el clima y en el ciclo hidrológico. Sin embargo se ha ignorado la importancia biológica, ecológica, fisicoquímica, socioeconómica y cultural de los suelos, lo cual ha contribuido a mantener los procesos de destrucción y degradación que los afectan.

La contaminación del suelo debido a los RSU tiene importantes repercusiones en el ambiente. El principal fenómeno de contaminación es la producción de lixiviados (substancias procedentes de la degradación de los RSU) generados principalmente por la humedad que presentan los RSU y las características de los sitios de disposición final (la humedad, las lluvias, etc); los lixiviados se filtran al suelo, lo que conlleva a la muerte de flora y fauna de la región, la alteración y rompimiento de las cadenas tróficas, así como la infertilidad de los suelos, debido al cambio en el pH, la friabilidad, la textura, la porosidad, la permeabilidad y la adecuada concentración de nutrientes en el suelo. Debido a los cambios que sufre el suelo, en muchas ocasiones queda inutilizable para cualquier otro fin, debido a que las capas que lo componen, actúan como atenuadores de los contaminantes, los cuales se impregnan a ellas. Asimismo, los materiales inertes (tales como las baterías, las pilas, los recipientes de productos químicos, entre otros), provocan la desaparición de la capa vegetal originaria de la zona así como la erosión del suelo. En ocasiones, los componentes químicos de los RSU, son asimilados directamente por los animales que ingieren los restos de comida presentes en ellos, provocando enfermedades y afectando de manera indirecta la salud del hombre.



En repetidas ocasiones se ha intentado reforestar y dar utilidad a los terrenos que alguna vez fueron utilizados como rellenos sanitarios, cuando ya se han clausurado o porque han llegado a su vida útil, pero el suelo queda tan deteriorado, que es muy difícil que estas zonas puedan volver a ser aprovechadas. De acuerdo con una evaluación del estado de los suelos en el país (Figura 6), el 45.2% de la superficie se encuentra degradada: 23.2% presenta degradación ligera, 19.7% moderada, 1.4% severa y 0.9% extrema. Los principales procesos causales son la degradación química (34.9 millones de hectáreas afectadas, principalmente por la pérdida de fertilidad y salinización), la erosión hídrica (23 millones de hectáreas) y la erosión eólica (18.5 millones de hectáreas) que, en conjunto son responsables del 87% de la superficie afectada del país (ILAC, 2005), y se puede generar una imagen del daño que se genera al mandar los RSU a los rellenos sanitarios, si se requieren de 0.12 ha de terreno por tonelada de RSU generados en un día.

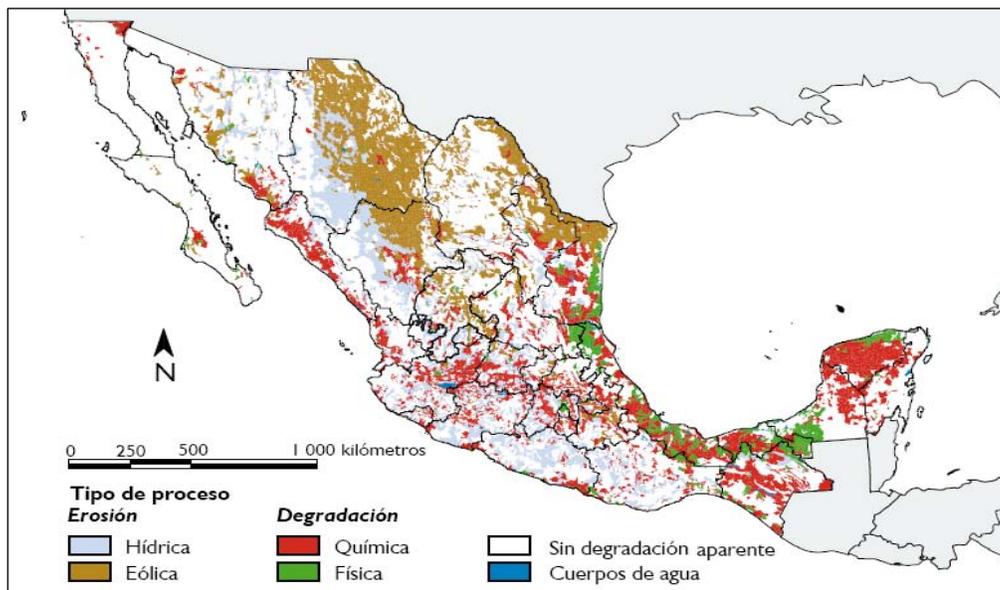


Figura 6. Principales procesos de degradación del suelo en México durante el año 2002.
Fuente: Iniciativa Latinoamericana y caribeña para el desarrollo sostenible (ILAC).



1.2.2 Contaminación del Agua

Los RSU dispuestos de manera inadecuada ocasionan con frecuencia la contaminación de las aguas tanto superficiales como las subterráneas. Cuando los RSU depositados en los parajes a cielo abierto, son mojados en temporada de lluvias o son arrastrados por efecto del viento, hasta cuerpos de agua, propician la contaminación de los mismos. Asimismo, los escurrimientos provenientes de los RSU, producto de su fermentación, se filtran arrastrando diferentes compuestos, formando una solución altamente corrosiva y en ocasiones poco inestable desde el punto de vista bioquímico (lixiviados); Las condiciones ácidas del relleno sanitario, hacen que los metales pesados allí presentes (como por ejemplo el cromo hexavalente, el mercurio, el cadmio y el níquel, muchas veces provenientes de las pilas), se disuelvan y viajen hasta las profundidades de la tierra junto con los lixiviados, que llega a contaminar los mantos freáticos, si el sitio de disposición no cuenta con los requerimientos mínimos de permeabilidad del suelo. La filtración de lixiviados puedan abarcar hasta los terrenos colindantes en un relleno sanitario, ya sea de forma vertical u horizontal. La filtración vertical se presenta a través de la estructura rocosa que se encuentra debajo del sitio del relleno sanitario, moviéndose por sitios insaturados hasta alcanzar los mantos acuíferos. La filtración horizontal se presenta cuando existen capas intermedias impermeables o cuando la permeabilidad de los RSU se ve altamente disminuida por exceso de compactación, llegando hasta cuerpos de agua cercanos al relleno sanitario.

Pero esta no es la única forma en que los cuerpos de agua son contaminados por causa de los RSU; en México es muy común ver cuerpos de agua (canales, ríos lagos, etc.) con la presencia de RSU, debido a que las personas tiran los RSU que generan en estos sitios. La presencia de estos materiales en el agua provoca que el ecosistema se vea gravemente afectado, debido a que al degradarse los RSU en el agua, ocasiona cambios significativos de pH, disposición de O₂ en el agua,



presencia de malos olores y proliferación de organismos patógenos, que pueden dañar la salud de los organismos presentes en ese entorno, entre otros, lo que ocasiona que estos cuerpos de agua ya no sean aptos para su uso, La presencia de RSU en los cuerpos de agua no sólo se da por la acción del hombre, ya que en muchas ocasiones los RSU que son depositados en los tiraderos a cielo abierto, en barrancas o en los rellenos sanitarios, por efecto de la lluvia o del viento, son conducidos hasta ellos, generando indirectamente la contaminación del agua.

En la Figura 7, se muestra una toma real del estado de los lixiviados en un relleno sanitario del Edo. de México y en la Figura 8, se muestra un ejemplo de contaminación del agua provocada por los RSU.



Figura 7. Lixiviados de un Relleno Sanitario en el Edo. de México.

FUENTE: Material propio



Figura 8. Contaminación del agua, por residuos arrojados
FUENTE: EL MUNDO. ES, 2007

1.2.3 Contaminación del Aire

Los problemas de contaminación del aire se derivan de los malos olores provenientes de la descomposición de los RSU, el cual es un proceso lento y no controlado, donde se generan gases (biogás). El hedor provocado de dicha descomposición, es posible percibirlo a varios kilómetros de distancia del sitio de disposición final.

El biogás, está integrado principalmente por dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), en una proporción de 50-50%, el cual se diluye en la atmósfera formando parte de los gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo al fenómeno del calentamiento global, siendo el metano el GEI más nocivo ya que tiene 21 veces más poder de retención de calor que el CO_2 . Según registros de la OECD para el año 2005, México se encontraba en el 7º lugar como emisor de CO_2 por uso de energía; lo que da una idea general del impacto ambiental que tiene México con respecto al cambio climático.



Los incendios provocados en los sitios de disposición final, por el aumento en la temperatura de los RSU debido a su descomposición (entre los 40 y los 60° C), es otra fuente de contaminación del aire. En muchas de las ocasiones, debido a la gran producción de CH₄, se producen incendios prolongados y recurrentes, sumándose la generación de cenizas y el humo producido. Estos problemas se agravan con presencia del viento, el cual arrastra los vapores, el humo y las cenizas generadas en los incendios a zonas cercanas afectando gravemente la salud de sus habitantes. Asimismo, los compuestos tales como aquellos derivados del cloro presentes en los plásticos, al quemarse emiten otros muy tóxicos como son las dioxinas, los furanos³ y el ácido clorhídrico. Asimismo, el aumento de los pañales desechables en los sitios de disposición final, ha incrementado las enfermedades respiratorias y digestivas. En la Figura 9, se presenta un ejemplo de este tipo de contaminaciones en los tiraderos a cielo abierto.



Figura 9. Contaminación del aire por incendios en los Tiraderos a Cielo Abierto.

FUENTE: [www.tabasco hoy.com](http://www.tabasco.hoy.com) 23/04/2008

³ Las dioxinas y furanos, son los nombres comunes por los que se conoce a dos grupos de sustancias organocloradas: las policlorodibenzo-p-dioxinas y los policlorodibenzofuranos, las cuales son generadas principalmente en los procesos industriales y de combustión, y que en el medio ambiente se encuentran ampliamente distribuidas en concentraciones muy pequeñas. Estos compuestos tienen efectos graves en la salud de las personas como son el debilitamiento del sistema inmunológico, afecciones en el desarrollo fetal, problemas en la piel, mutagenicidad y carcinogénesis (en hígado, fosas nasales, lengua o paladar). Por sus características físico-químicas, tienen un gran potencial para afectar la salud humana y el ambiente; por su carácter de compuestos persistentes y lipófilos, se incorporan y transmiten a través de la cadena alimentaria concentrándose y ocasionando estragos al medio en el que actúan; este tipo de sustancias ha causado estragos en diferentes partes del mundo, como las intoxicaciones masivas por el consumo de aceite de arroz contaminado en Yuso (Japón, 1968) y en Yu-Cheng (Taiwán, 1979).



1.3. Problemática económica

La población en general ve los RSU como algo que carece de valor comercial o de reuso; estos mismos resultan tan molestos que hasta se paga para deshacerse de ellos, por lo que muchas veces no se asignan recursos suficientes en este rubro. Las condiciones económicas en México, han limitado la asignación de recursos federales destinados a financiar el servicio de limpia, aunado a que normalmente las autoridades municipales dan preferencia a otro tipo de obras y servicios que consideran de mayor prioridad. Sin embargo, el Banco Nacional de Obras (BANOBRAS), Institución Nacional de Crédito, cuenta con programas de financiamiento como es el Programa de Residuos Sólidos Municipales (PRORESOL) al que tienen acceso los estados y municipios. Sin embargo la realidad es que los RSU representan toda una cadena productiva para el aprovechamiento de materiales reciclables o reusables

Los problemas económicos que se presentan en el tratamiento y disposición de los RSU, corresponden a la falta de financiamiento para una gestión integral y desarrollo sustentable de ellos, principalmente debido a la carencia de estructuras de recuperación de costos de financiamiento y de operación, así como la baja producción de facturación (cobro por el servicio) de los municipios o ciudades. Las autoridades locales tienen la creencia que el cobro por el servicio de recolección y disposición de los RSU, afecta su imagen política. Por su parte, la población tiene la idea, que el servicio de limpia está incluido en el impuesto predial, y no siempre es el caso, incluso cuando se lleva a cabo, esta forma la subvaluación de los predios, limita el ingreso y por lo tanto, no se cubren los costos operativos del servicio.



Por lo general, el control presupuestal de los servicios municipales está centralizado en la contabilidad general del municipio, y se registra por concepto y no por proceso. En la mayoría de los casos, los responsables del servicio (aún los directores) no tienen acceso a él. Esto impide llevar un control de costos para mejorar los servicios. Aunado a esto se presenta una mala distribución de los recursos financieros, asignados a las distintas dependencias, destinados para el manejo de los RSU, lo que se traduce en un rezago en las alternativas de disposición final de los mismos.

Existen grandes problemas en lo que corresponde al manejo, al traslado y a la disposición final de los RSU, no sólo por los malos manejos de los recursos financieros, sino por los altos costos de recolección y traslado, así como por el manejo de estos. Los costos asociados al manejo y disposición de los RSU, se ven afectados directamente por las grandes distancias que existen entre los centros de generación de los mismos y los sitios de disposición final (generalmente superan los 15 km. de distancia), lo que obliga a los municipios al uso creciente de estaciones de transferencia para disminuir los costos de traslado; esta actividad se ha venido desarrollando con mayor frecuencia en las poblaciones que tienen un crecimiento poblacional elevado; trayendo la difícil tarea de localizar sitios para disposición final cercanos al centro de generación de los RSU, con los respectivos problemas de costos de los terrenos, así como el rechazo de la población para la construcción de rellenos sanitarios en terrenos periféricos de las localidades.

Más del 75% de los RSU recolectados en las ciudades de la República pasan por estaciones de transferencia, tal es el caso de ciudades como Querétaro, Qro., Cd. Juárez, Chih., Tepatitlán, Jal., San Luis Potosí, SLP, Cd. del Carmen, Cam., Guadalupe, NL., y el DF, entre otras, teniendo costos con amplio espectro de



variación reportado desde \$40.00 hasta \$90.00 por tonelada de RSU⁴ (OPS, 2003).

Además de los problemas económicos ya mencionados, se presentan otros que no corresponden al financiamiento público, sino a la parte catastral. El precio de las viviendas cercanas a un relleno sanitario o a un tiradero a cielo abierto, es muy bajo, debido principalmente a la presencia de malos olores, de fauna nociva y a la mala imagen que da este tipo de sitios a la comunidad, por lo que el mercado de viviendas se encarga de internalizar este efecto. Sin embargo, esto sólo se aplica cuando las personas que compran las viviendas se encuentran conscientes de que existe un sitio de disposición final, pero cuando se ha adquirido una propiedad con anterioridad a la ubicación de un sitio de disposición final, la situación provoca un descenso en el valor de la propiedad sin que existan mecanismos automáticos de compensación.

⁴ Los costos de transferencia varían en función de la cantidad de residuos manejados y la distancia que se recorre a los sitios de disposición final, así como a los costos de los energéticos para el transporte.



2. ALTERNATIVAS ACTUALES PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RSU

Existen tres clases de tratamiento de los RSU:

- I. Los tratamientos biológico-químicos.
- II. Los tratamientos físicos.
- III. Los tratamientos térmicos.

Los tratamientos biológico-químicos, se desarrollan principalmente a bajas temperaturas y bajas velocidades de reacción; en la alimentación aceptan altos niveles de humedad pero requieren de material biodegradable, algunas de estos procesos involucran síntesis de productos químicos en varias etapas. Los subproductos que se obtienen de estos procesos son biogás y abonos.

Los tratamientos físicos, se usan principalmente en el acondicionamiento de los RSU, para después ser enviados a otro tratamiento; incluyen la separación o secado de los desperdicios par facilitar el proceso. El material resultante es un combustible derivado del residuo (CDR) y puede ser densificado hasta llegar a ser pellets (en forma alargada y a base de madera), a este grupo pertenece la Digestión Anaerobia.

Los tratamientos térmicos, habitualmente operan en un intervalo de temperaturas que va desde los 370 hasta los 537° C; presentan altas velocidades de reacción y se utilizan para generar electricidad como subproducto primario, a través de un avanzado proceso de reciclaje térmico en el cual se produce una conversión térmica del carbón orgánico (con una pequeña porción de residuos sólidos y gas sintético). Se obtienen subproductos tales como químicos, combustibles,



gasolinas, entre otros. Dentro de este grupo se encuentran el proceso de Incineración y el de Reciclaje Térmico Avanzado, el cual utiliza la combustión del carbón orgánico que se lleva a cabo en un ambiente rico en bióxido de carbono y agua generando subproductos como cenizas de fondo, cenizas volátiles y vapor, a temperaturas de 704 a 1371° C. El vapor que se origina se utiliza para generar electricidad. Los gases enfriados (desperdicio) bajo un sistema controlado, se transforman en subproductos como yeso y ácido clorhídrico; las cenizas son separadas y recicladas ya que permiten la recuperación de metales.

A continuación se describen *in extenso*, algunas de los procesos antes mencionados.

2.1. Digestión Anaerobia

La Digestión Anaerobia (DA), puede ser definida como la conversión de la materia orgánica en dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), y lodos, mediante el empleo de bacterias en un ambiente pobre en oxígeno. El proceso de DA, es una de las formas más antiguas de digestión y ocurre naturalmente en ausencia de oxígeno, como en las ciénegas y los rellenos sanitarios. La eficiencia y la estabilidad de la DA pueden variar significativamente por el tipo de digestor empleado, así como por los parámetros de operación.

Los procesos de DA para RSU se han clasificado en dos grandes rubros, la DA de Sólidos Secos y DA de Sólidos Húmedos. Se considera como DA de Sólidos Secos cuando los sólidos totales son superiores al 20% y se considera como DA de Sólidos Húmedos debido a que los residuos contienen menos del 10% de sólidos totales (FORSTER, 2007).



La digestión anaerobia es un proceso donde la biomasa (fracción orgánica) es digerida por bacterias, este proceso es una de las opciones para el tratamiento de la fracción orgánica (restos de vegetales, follaje, o materiales fácilmente degradables) de los RSU. La fermentación microbiana en ausencia de oxígeno da lugar a una mezcla de gases (biogás) y a una suspensión acuosa o lodo, que contiene los componentes difíciles de degradar, así como minerales inicialmente presentes en la biomasa. En este proceso se utiliza materia prima con alto contenido de humedad. La calidad y cantidad del biogás que se produce, son dependientes de la composición de los desechos utilizados. El gas producido puede ser utilizado como medio de calentamiento o para producir energía eléctrica.

2.1.1 El proceso de DA

La digestión anaerobia se desarrolla en tres etapas durante las cuales la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas para producir biogás como producto final, por la acción de diferentes tipos de bacterias, estas etapas son:

- Hidrólisis y acidogénesis
- Acetogénesis
- Metanogénesis

Cada una de éstas etapas, presentan una población bacteriana fisiológicamente única, la cual es la responsable de la transformación de la materia, cada una de las poblaciones formadas requieren de condiciones ambientales adecuadas. La digestión no es completada hasta que el sustrato ha pasado por estas tres etapas.



En la Hidrólisis, la materia orgánica compleja es transformada en sus componentes principales (monómeros, como los azúcares, aminas o ácidos grasos), mediante una reacción controlada por enzimas. La fase hidrolítica, es relativamente lenta para residuos celulósicos en bruto, que contienen lignocelulosa (United-tech Inc, 2007). Por esta razón los residuos de madera, generalmente no son procesados anaerobiamente. Los monómeros son inmediatamente aceptados por las bacterias acidogénicas. Durante la acidogénesis, las bacterias convierten los productos de la hidrólisis en compuestos orgánicos simples mediante fermentación y otros procesos metabólicos. Los nuevos productos son principalmente compuestos de cadenas cortas (compuestos volátiles) como ácidos, alcoholes y cetonas.

La segunda etapa de la DA es la acetogénesis, en la cual las bacterias acetogénicas, convierten los ácidos y los alcoholes, en acetato, hidrógeno (H_2) y CO_2 , los cuales son usados en los procesos siguientes. Los productos formados en esta etapa varían con el tipo de bacterias empleadas, así como de las condiciones como el pH. La transición del sustrato de la materia orgánica a ácidos orgánicos, causan que el pH del sistema se eleve, esto es benéfico para las bacterias acidogénicas y las acetogénicas, ya que prefieren un ambiente un poco ácido (pH 4.5 a 5.5) y son menos sensibles a los cambios en el flujo de alimentación (GAS TECHNOLOGY INC, 2003).

En la etapa conocida como metanogénesis, las bacterias metanogénicas se encargan de transformar los compuestos producidos en la etapa anterior en CH_4 y CO_2 ; aproximadamente dos tercios del CH_4 generado es derivado del acetato, mientras que el otro tercio proviene de la reacción de reducción entre el CO_2 y el H_2 (UNITED-TECH INC, 2007). Se tiene que recordar que la eficiencia de cada etapa se ve influenciada por la temperatura, el pH y el tiempo de residencia.



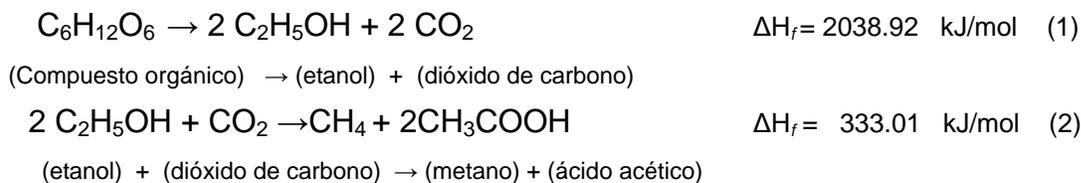
El digestor puede requerir o no de un aporte de energía para mantener el sustrato a temperaturas elevadas para acelerar el proceso de digestión. El reactor podrá operarse en los rangos *psicrofílico* (temperatura ambiente), *mesofílico* (temperaturas en torno a los 35°C), o *termofílico* (temperaturas en torno a los 55°C) (IDAE, 2007).

En los fermentadores y/o digestores, el producto de la degradación de los materiales, da como resultado la generación de biogás, del cual su composición puede variar, dentro de los siguientes valores (IDAE, 2007):

- 50-70% de metano (CH₄)
- 30-40% de dióxido de carbono (CO₂)
- ≤ 5% de hidrógeno (H₂), ácido sulfhídrico (H₂S) y otros gases.

El poder calorífico del biogás obtenido mediante la digestión anaerobia de los residuos orgánicos se encuentra entre 5-7.5 kWh/m³, esto dependerá del contenido de metano, en promedio se encuentra en 6 kWh/m³ o 21 MJ/m³ (EUTEC INGENIEURE GbR, 2007).

2.1.2 Reacciones características de la DA⁵



⁵ OSTREM, 2004



(ácido acético) → (metano) + (dióxido de carbono)



(dióxido de carbono) + (hidrógeno) → (metano) + (agua)

2.1.3 *Sistemas empleados en la DA*

La DA puede ser utilizada como un sistema de cultivo “batch” o “continuo”. En el “cultivo en batch” el sustrato es introducido e inoculado con bacterias dentro de un reactor a una temperatura adecuada, el sustrato permanece dentro del reactor sin ninguna alteración hasta que el proceso haya terminado. Las bacterias comienzan a crecer dentro del reactor y si las condiciones son aptas, la tasa de crecimiento será constante hasta que el sustrato se termine o las condiciones dentro del reactor sean modificadas hostilmente para no continuar con el crecimiento. Las bacterias en un reactor batch después de un tiempo entran a una fase más lenta y finalmente detienen su creciendo, lo que simboliza que el cultivo ha llegado a su fin, por lo tanto el sustrato residual y las células bacterianas deben de ser removidos del reactor y el reactor debe de ser rellenado nuevamente con sustrato fresco e inóculo bacteriano; el inóculo puede ser provisto dejando una pequeña cantidad del cultivo previo en el tanque. El intervalo de tiempo de retención de los reactores para un sistema en “batch” va de los 30 a los 60 días y sólo un tercio del volumen del tanque es utilizado en la digestión activa (OSTREM, 2004).

El sistema de “cultivo en continuo” es similar excepto que es adicionado nuevo sustrato después de que el primer lote ha sido utilizado y se ha dado un cierto tiempo de crecimiento de las bacterias. Al término del tiempo de residencia del sustrato en el reactor es bombeado fuera una gran cantidad del volumen del reactor, dejando un pequeño volumen y casi en seguida es adicionado nuevo sustrato en intervalos hasta que el reactor es llenado; el volumen que se dejó



dentro del reactor contiene las bacterias que inocularán el sustrato fresco. Este proceso continua repitiéndose una y otra vez, generando un proceso continuo (HOBSON, 1992). El sistema continuo puede tener un tiempo de retención de hasta 20 días (OSTREM, 2004).

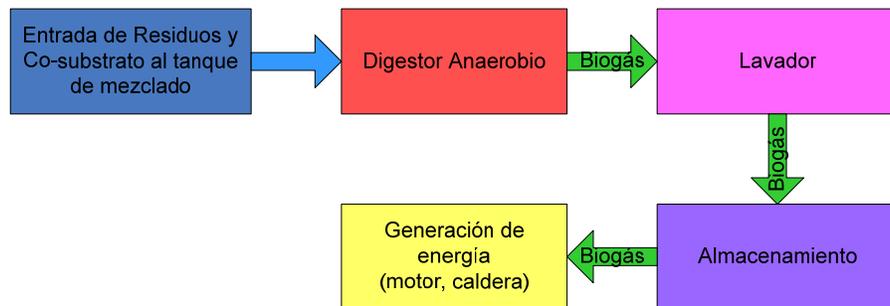


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de Digestión Anaerobia
FUENTE: Elaboración propia.

En un reactor batch la generación de productos se da en forma de campana, es decir durante un tiempo existe un incremento en la generación de productos, hasta llegar a un punto de equilibrio, después de este punto se da un decremento en la tasa de producción, antes de que el sustrato sea completamente digerido. En un reactor continuo, la generación de productos es constante, pero a una tasa variable, debido al tiempo empleado en llenar el tanque. Con un sistema en batch o en continuo, existe un periodo en donde el reactor es rellenado y puesto en marcha, por lo tanto la producción de gas durante este periodo es pequeña o nula (HABSON, 1992).

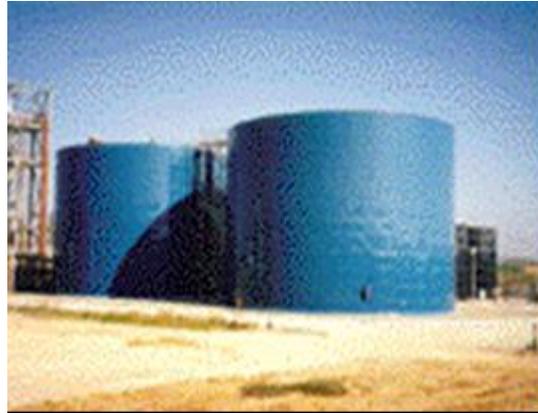


Figura 11. Imagen de unos Digestores Anaerobios
FUETE: www.mspesp.com/diganae.htm

El reactor a utilizar dependerá de las necesidades de cada caso, así como del presupuesto y el espacio. Sin embargo no se debe de pasar por alto que existen variables interdependientes para la elección de un reactor de DA como son la concentración de sólidos degradables, la velocidad de alimentación de los sólidos, así como el tiempo de retención. Los digestores utilizados deben de reunir diferentes características como el ser herméticos, térmicamente aislados y tener un medio para romper las natas que se forman durante el proceso, por mencionar las más importantes. Existen varios tipos de digestores, de éstos los más comunes son los digestores de remoción convencional (“alto flujo”), que utilizan una recirculación de gas para mejorar el balance de energía y elevar la producción de gas. En la Tabla 3, se enuncian los diferentes tipos de sistemas de digestión anaerobia y sus características más relevantes.



Tabla 3. Tipos de digestores anaerobios (IDAE, 2007)

Tipo de Digestor	Características principales
De mezcla completa sin recirculación	Reactor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos, ya que consta de un sistema de agitación. No ofrece problemas de diseño y es el más utilizado para residuos. El tiempo de retención necesario es alto. Considera la velocidad de reacción en la estimación del tiempo de reacción.
De mezcla completa con recirculación (o de contacto)	Es el equivalente al sistema de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales. Regulando la recirculación es posible conseguir tiempos de retención más bajos que en un reactor simple de mezcla completa. Sistema sólo aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica.
Reactor con retención de biomasa, sin recirculación	<p>En este reactor se consigue retener bacterias en el interior del reactor, evitando la configuración de reactor de mezcla completa. Los métodos de retención de biomasa son básicamente dos: a) inmovilización sobre un soporte y b) agregación o floculación de biomasa y su retención por gravedad.</p> <p>Entre estos reactores se encuentran los <i>reactores de flujo pistón</i>. En estos reactores la tasa de crecimiento de microorganismos a la entrada del reactor es más elevada, haciendo que la concentración media del reactor sea superior que la concentración en un reactor de mezcla completa; esto provoca que el tiempo de retención en el reactor sea más bajo. Este reactor es aplicado a diferentes tipos de residuos orgánicos, como lo es la fracción orgánica de los RSU.</p>
Sistemas discontinuos	En un sistema discontinuo, la curva de evolución temporal de la producción de biogás sigue la misma tendencia que la curva típica del crecimiento de microorganismos. En este reactor el concepto tiempo de residencia no tiene sentido, ya que se habla de tiempo de digestión. Para conseguir una



Tipo de Digestor	Características principales
	producción de biogás cercana a la continuidad deben combinarse varios reactores discontinuos. Son reactores aplicados a residuos con alta carga de sólidos.
Otros sistemas (los reactores anteriores pueden ser combinados para conseguir sistemas más eficientes)	<i>Sistemas de dos etapas:</i> Estos sistemas consisten en dos rectores, el primer rector es de un tiempo de retención elevado, con el objetivo de favorecer la hidrólisis, después se coloca otro reactor, de un tiempo de retención más bajo, en el que se digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la etapa anterior. Este sistema permite controlar fácilmente la temperatura. Estos sistemas han sido aplicados con éxito para el tratamiento de los RSU.
	<i>Sistemas de dos fases:</i> La separación de fases se refiere a mantener dos reactores en serie, en los cuales se realiza, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis, teniendo como objetivo un tiempo de retención más bajo al correspondiente de un reactor de mezcla completa. Este tipo de sistemas ha sido aplicado a la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y baja concentración de sólidos.
	<i>Sistemas híbridos:</i> Principalmente son sistemas que combinan los conceptos que sustentan los diferentes tipos de reactores descritos. Los dos sistemas antes mencionados podrían considerarse como tales.

Cuando la digestión de los residuos ha finalizado, los lodos producto de la digestión anaerobia son retirados, el agua que contienen es filtrada y recirculada al digestor, y el residuo retenido en el filtro se estabiliza aerobiamente, usualmente en montículos para formar composta. La composta producida está compuesta por trazas de materiales indeseables como trozos de vidrio o piezas de plástico y se vende como abono sólido; la calidad de la composta depende de la composición de los RSU alimentados al digestor. Algunos países tienen estándares



preestablecidos para la calidad de la composta, como es el caso de los EUA, en donde el Departamento de Agricultura tienen estándares para el contenido de metales pesados en la composta, estos estándares son definidos para la composta generada por procesos anaerobios (VERMA, 2002).

2.2. Incineración

La incineración es uno de los procesos térmicos que pueden aplicarse en el tratamiento de los RSU, residuos biológico-infecciosos, comerciales e industriales para reducir en gran medida el peso (75%), el volumen (90%) y aprovechar la energía que contienen (ORTINEZ, 2001). El proceso principal que se lleva a cabo durante la incineración, es la oxidación de los materiales alimentados al reactor; esta tecnología opera en un intervalo de temperatura que va de los 700°C a temperaturas mayores a los 1650°C⁶, la temperatura puede variar dependiendo de la composición de los residuos alimentados al incinerador; para poder destruir compuestos orgánicos difíciles de quemar se necesitan temperaturas mayores (SALDIVAR, 2004). Los incineradores por lo general cuentan con 2 cámaras, la primera es donde son oxidados los RSU y en la segunda cámara es en donde se queman los gases productos de la combustión, así como los sólidos que permanecen sin oxidarse. Además de generar calor, utilizable como fuente energética, la incineración genera CO₂, óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), dioxinas, furanos, cenizas volátiles y residuos sólidos sin quemar. Para que la combustión sea completa y se evite la generación de productos indeseables tales como humos, partículas y olores; es necesario que todos los componentes se encuentren bien mezclados y en la proporción adecuada. La oxidación es completa cuando se tiene una combinación adecuada del aire con el carbono e hidrógeno del residuo.

⁶ Solid Waste Management Manuals, 2000



2.2.1 El proceso de Incineración

La incineración de residuos implica el cumplimiento de varias etapas; las plantas modernas son un sistema completo en donde muchas de estas etapas son parte del proceso⁷:

- Separación. En esta etapa se trata de remover los componentes que no son fácilmente quemados (metales y vidrio), así como compuestos que pudieran dar como resultado compuestos altamente contaminantes o tóxicos (Mercurio y compuestos clorados).
- Preparación. Durante la etapa de preparación se extraen de la basura los objetos más voluminosos que pudieran atascar la unidad incineradora (muebles, línea blanca). También se pueden utilizar trituradores para reducir el tamaño de los objetos, además de que se logra de esta forma una mayor homogeneidad del material alimentado.
- Secado. En la etapa de secado se calientan los residuos con los gases de salida del reactor, así como con la radiación proveniente de la cámara de combustión para reducir la humedad de los residuos y de esta forma, aumentar la eficiencia del reactor. Si el valor de la humedad es elevado disminuye el poder calorífico inferior y la inflamabilidad es menor, reflejándose un mayor consumo de energía calorífica aplicada a los RSU, para ser oxidados; el valor límite recomendable de humedad es del 50%.
- Alimentación de los residuos. Durante la incineración los residuos son alimentados de manera continua para evitar entrada de aire y la salida de gases de combustión, de esta forma se lleva a cabo un mejor control del proceso.

⁷ SALDIVAR, 2004



- Incineración primaria. En esta etapa se llevan a cabo las reacciones de oxidación de los RSU y los compuestos volátiles, esto se realiza con la ayuda de quemadores, los cuales proporcionan la energía necesaria para que se lleven a cabo las reacciones.
- Incineración secundaria. En esta etapa se utilizan quemadores auxiliares y se inyecta aire en exceso para completar la combustión.
- Tratamiento de escorias y de aguas residuales.
- Tratamiento de los gases. Los gases producto de la combustión pasan por un sistema de limpieza integrado por una serie de equipos diseñados para limpiarlos de partículas y gases.

En la Figura 12 se presenta el diagrama de flujo estándar para el proceso de incineración, desde la fase de recolección de los RSU.

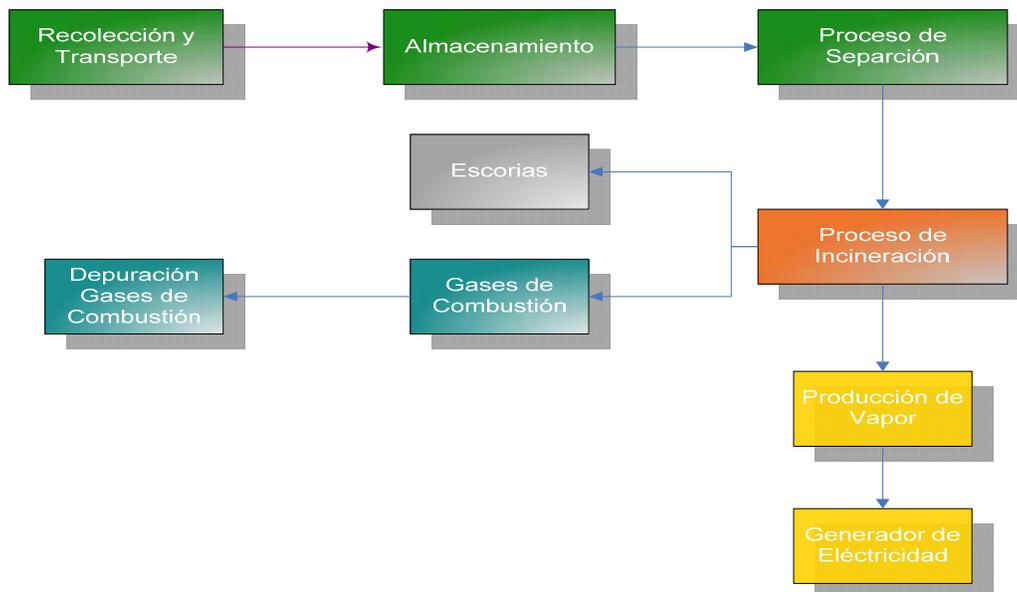


Figura 12. Diagrama de Flujo del Proceso de Incineración

FUENTE: Elaboración propia



Existen factores importantes que se deben de tener en cuenta para un proceso de incineración de RSU. Los factores más importantes que influyen en un sistema de incineración son la temperatura de operación de la combustión, el tiempo de residencia de los residuos dentro de la cámara de combustión y turbulencia o grado de mezclado de los residuos, así como la humedad de los RSU.

El tiempo de residencia de los RSU dentro del incinerador es un factor importante para garantizar la destrucción de todos los compuestos presentes, el tiempo debe ser mayor a una hora. El intervalo que normalmente se maneja va de una hora a 5 horas. El tiempo de residencia de los gases dentro de la cámara de combustión debe ser mayor a dos segundos. Para que exista una buena combustión el contenido mínimo de oxígeno a la salida en los gases debe ser menor del 11%⁸.

El grado de mezclado de los residuos está relacionado con el tipo de parrilla y la eficiencia para lograr que los residuos sean homogéneos al momento de la incineración. Dentro de un incinerador se deben evitar las zonas muertas, por poco tiempo de residencia, materia orgánica sin quemar y la formación de CO (generan problemas de corrosión)⁹.

2.2.2 Reacciones características de la Incineración

Las reacciones que se llevan a cabo dentro de un reactor de incineración (horno), son principalmente de oxidación, debido a que se llevan a cabo en un ambiente rico en oxígeno. El comburente (oxígeno) alimentado, es proporcionado por el aire,

⁸ IDEM

⁹ IDEM



o puede ser oxígeno puro. Las reacciones químicas presentes en un proceso de combustión son:



Debido a la composición química tan variada de los RSU, en la práctica se debe emplear oxígeno adicional para incrementar la eficiencia de combustión, promoviendo la mezcla y la turbulencia en el hogar del incinerador. El exceso de aire suministrado está en función del tipo de incinerador. En el caso de los diseños con paredes refractarias, el aire en exceso puede llegar hasta el 200% del valor teórico necesario, aunque en los diseños con paredes de tubos de agua este valor suele ser menor. El uso de este exceso de aire afecta la temperatura y la composición de los productos de la combustión. Mientras éste aumente, el contenido de oxígeno en los gases de chimenea también se incrementa y la temperatura de combustión disminuye (ARCIGA, 1999). Para elevadas temperaturas se recomienda el uso de oxígeno puro, debido a que el aire alimentado es una mezcla de gases que pueden llegar a tener alguna participación durante la combustión de los materiales.

La incineración de los RSU, no es tan sencilla, ya que existen materiales dentro de los RSU, que llegan a contener en su estructura molecular azufre y nitrógeno, por lo que estos materiales son oxidados, formando compuestos azufrados (SO_x) y nitrogenados (NO_x) (PITCHEL, 2005). Los compuestos nitrogenados, se llegan a formar por la fijación del nitrógeno atmosférico, presente en el reactor (SALDIVAR, 2004).



Para poder asegurar la destrucción de las moléculas orgánicas complejas formadas en la combustión, las cuales pueden salir con los gases de combustión, algunas veces se someten éstos a un proceso adicional en el cual la temperatura es superior a 850°C durante un tiempo no inferior a 2 segundos y con un contenido de oxígeno superior al 6%. Los gases se introducen en una caldera de recuperación para producción de vapor con el que pueda obtenerse energía eléctrica por medio de una turbina.

2.2.3 Tipo de incineradores

Un incinerador es la agrupación de equipos que en su conjunto forman una planta incineradora: incluye instalaciones para el manejo y almacenamiento de los residuos, sistemas de alimentación, hornos, sistemas de limpieza de gases, tratamiento de aguas residuales y servicios auxiliares (Trejo, 1996).

Tabla 4. Tipos de incineradores

Tipo de Incinerador	Características principales
Incinerador por inyección líquida	Este tipo de incinerador consta de un sistema de inyección líquido para quemar compuestos con valores calóricos altos. Alcanzan temperaturas entre 700 y 100°C.
Incinerador de dos cámaras con aire controlado	En este sistema el horno cuenta con una cámara primaria y secundaria. Son hornos que pueden trabajar en lotes o continuamente, realizándose la combustión principalmente en el hogar más que en las parillas. Este sistema consiste de una cámara primaria en la



	<p>cual el residuo es alimentado y encendido por medio de un quemador auxiliar con gas o aceite. A la segunda cámara pasan los gases de combustión donde se recalientan con un quemador y se adiciona aire con la finalidad de que la combustión de los compuestos orgánicos o volátiles sea completa.</p>
Incinerador de horno múltiple	<p>Este tipo de incinerador está diseñado especialmente para materiales con bajos valores caloríficos, por lo que no crea altas temperaturas en la zona de combustión. Consta de un brazo mecánico el cual mueve continuamente el material con la finalidad de facilitar su oxidación, necesita una gran cantidad de combustible para mantener la temperatura dentro del sistema.</p>
Incinerador de lecho fluidizado	<p>En este incinerador el aire caliente es bombeado a través del fondo de un horno vertical lo cual hace flotar y calienta una masa de arena y otros materiales, la que atrapa las partículas de residuo sólido para que sean quemadas completamente. Es posible generar electricidad si se utiliza el calor generado en exceso. Para que el proceso sea estable es necesario que el residuo este triturado y se distribuya uniformemente a lo largo del lecho.</p>
Incinerador de horno rotatorio	<p>El horno es un cilindro grande que rota sobre llantas de acero que giran sobre rodillos presentado una ligera pendiente. El material se transporta a través del horno por rotación del cilindro inclinado, lo que permite el material se mueva a lo largo de él. El aire para la combustión es introducido por medio de un ventilador de tiro inducido localizado en la parte posterior del cilindro, la velocidad de giro del horno, así como el movimiento de los residuos a través de el dependen de su tamaño. Se requiere de un espacio amplio para su instalación.</p>

Fuente: Elaboración propia a partir de Saldívar, 2004.



La recuperación de energía es posible con la mayoría de los sistemas de incineración existentes; los gases de salida se introducen en una caldera de recuperación para producción de vapor con el que pueda obtenerse energía eléctrica por medio de una turbina. En ocasiones se combinan con turbinas de gas para mejorar el rendimiento energético de la planta. La decisión sobre su instalación vendrá condicionada por otro tipo de factores, como son el tipo de RSU que se vaya a incinerar, la cantidad que se tratará, la existencia de mercado para la aplicación térmica de vapor, de agua caliente, de electricidad, y el peso de los costos que conlleve; las instalaciones de aprovechamiento energético incrementarán el tiempo de construcción y de forma muy considerable la inversión inicial, además de crear un importante conjunto de necesidades a la hora de su correcto funcionamiento y mantenimiento.

Sin embargo, algunos de los aspectos por los que se reserva el uso de estas tecnologías son los medioambientales, debido a la generación de emisiones a la atmósfera de productos tóxicos como las dioxinas y furanos¹⁰; es por esto que la incineración ha sido atacada fuertemente, lo que provoca que las disposiciones y normas legales que limitan las emisiones de las incineradoras sean cada vez más estrictas de modo que ha sido necesario desarrollar nuevas tecnologías para el sistema de combustión y para el sistema de depuración.

¹⁰ Las dioxinas y furanos, son los nombres comunes por los que se conoce a dos grupos de sustancias organocloradas: las policlorodibenzo-p-dioxinas y los policlorodibenzofuranos, las cuales son generadas principalmente en los procesos industriales y de combustión, y que en el medio ambiente se encuentran ampliamente distribuidas en concentraciones muy pequeñas. Estos compuestos tienen efectos graves en la salud de las personas como son el debilitamiento del sistema inmunológico, afecciones en el desarrollo fetal, problemas en la piel, mutagenicidad y carcinogénesis (en hígado, fosas nasales, lengua o paladar). Por sus características físico-químicas, tienen un gran potencial para afectar la salud humana y el ambiente; por su carácter de compuestos persistentes y lipófilos, se incorporan y transmiten a través de la cadena alimentaria concentrándose y ocasionando estragos al medio en el que actúan; este tipo de sustancias ha causado estragos en diferentes partes del mundo, como las intoxicaciones masivas por el consumo de aceite de arroz contaminado en Yuso (Japón, 1968) y en Yu-Cheng (Taiwán, 1979).



2.3. Gasificación

La gasificación es una tecnología que convierte materiales sólidos o líquidos orgánicos (que contienen carbono en su estructura tales como los RSU), en un gas sintético de moléculas más simples (CO y H_2); la conversión se da en condiciones, muy controladas de temperatura y alimentación de O_2 . El proceso se lleva a cabo en una atmósfera pobre en oxígeno, siendo ésta reductora para el agente gasificador, el cual típicamente es vapor, pero puede ser aire u oxígeno; el oxidante utilizado juega un papel importante en la composición del gas generado. En el caso del aire, se genera el llamado gas pobre por su bajo poder calorífico, como consecuencia del alto contenido en nitrógeno, mientras que en el caso del oxígeno o vapor de agua, da lugar al llamado gas de síntesis que tienen un poder calorífico mayor (MENDOZA, 2006).

La gasificación no es una combustión. El gas sintético formado durante la gasificación está compuesto principalmente de H_2 y CO , debido a que el oxígeno alimentado es muy poco, a diferencia de la incineración, que es una combustión en un ambiente rico en oxígeno. La gasificación disocia el H_2O en H_2 y O_2 , mientras la incineración combina el hidrógeno y el oxígeno para formar vapor de agua. Algo muy importante es que en la incineración se forman sustancias complejas, incluyendo sustancias peligrosas, mientras que en la gasificación las moléculas de las sustancias peligrosas son disociadas en gases más simples (ADVANCED ENERGY STRATEGIES INC, 2004).

La gasificación emplea altas temperaturas controladas para el proceso de conversión química, las cuales se encuentran en el intervalo de 800°C a $1,800^\circ\text{C}$ (HIGMAN, 2003) y en el caso de gasificación con plasma la temperatura puede llegar a los $5,000^\circ\text{C}$ (SOLENA GROUP). Esta tecnología está muy bien establecida y ha sido usada en una gran variedad de aplicaciones por más de 100



años, como por ejemplo la conversión de materiales como el carbón, el coque de petróleo y la biomasa en una amplia gama de combustibles y químicos (ADVANCED ENERGY STRATAGIES INC, 2004). La aplicación de la gasificación para los RSU es relativamente una nueva área (a principios del siglo XX). En la Figura 13, se muestra el diagrama de flujo estándar para el proceso de gasificación.

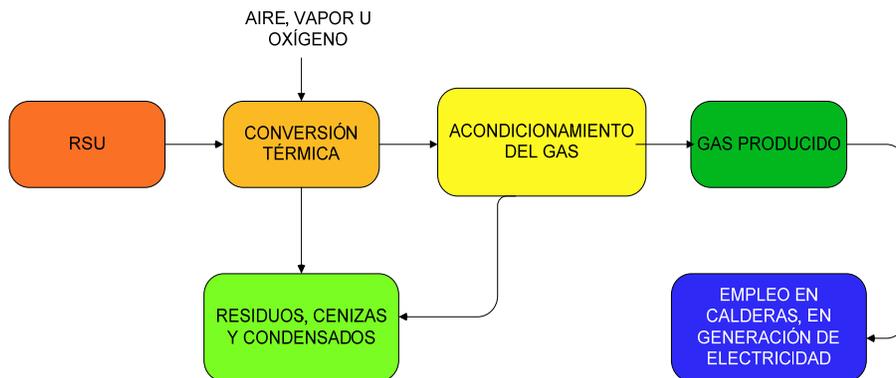


Figura 13. Diagrama de flujo del proceso de Gasificación
FUENTE: Elaboración propia

2.3.1 El proceso de Gasificación

Las etapas principales de la gasificación son las siguientes:

- Pretratamiento/alimentación
- Gasificación
- Control y/o limpieza de los gases producto



En la Figura 14, se representa como ejemplo, los procesos principales que se llevan a cabo en el proceso de gasificación de RSU.

Pretratamiento/alimentación. En esta etapa, los RSU son preacondicionados antes de su alimentación al proceso de gasificación, ya sea por medio de centros de reciclaje para poder separar los materiales reutilizables y/o eliminar los materiales que no pueden ser alimentados al gasificador (metales), si así lo requiere; o a través de un pretratamiento aplicado a los mismos donde se aprovecha la fracción de rechazo. Algunos gasificadores requieren de la alimentación de un determinado tamaño de partícula, con lo que se mejora notablemente la gasificación, ya que el material que se alimenta al gasificador, es más fácil de manejar y es un material más homogéneo, por lo que los RSU son conducidos a centros de trituración para obtener el tamaño de partícula deseado. Posteriormente, los RSU son enviados y colocados en una fosa de almacenamiento, para después ser transportados hasta la cámara de gasificación.

Durante el pretratamiento se trata de reducir la humedad de los RSU, ya que ésta propiedad puede bajar la eficiencia del gasificador, en el sentido de que se debe de suministrar más energía calorífica para poder gasificar los RSU, además de que debido a la presencia de una gran cantidad de vapor de agua en el gasificador, la obtención de un gas de salida más limpio se ve alterado, por las reacciones en las que está presente el agua.

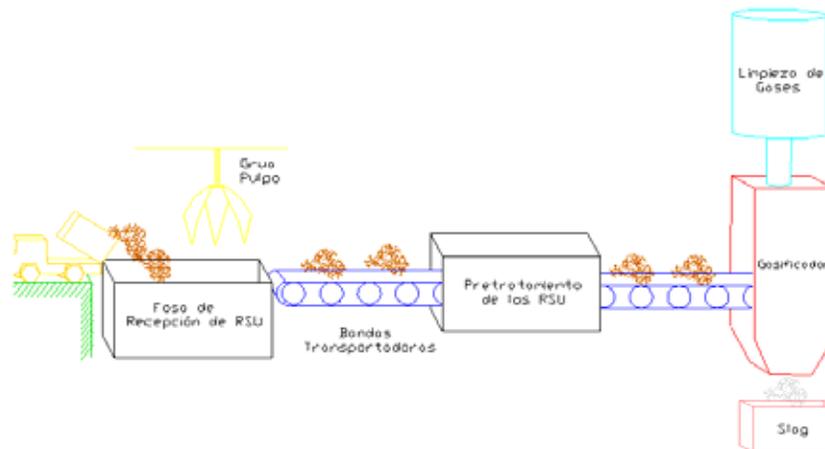


Figura 14. Esquema del proceso de gasificación

Gasificación. En el proceso de gasificación se pueden identificar tres zonas principales: la zona de pirólisis, la zona de oxidación o combustión parcial y la zona de secado. En la Figura 15, se presenta un esquema simplificado de dicho proceso.

En la zona de pirólisis¹¹, se lleva a cabo la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno u otros agentes gasificantes, generándose cantidades variables de gases (gas de síntesis), líquidos (alquitranes y aceites) y residuos carbonosos. El intervalo de temperaturas empleados oscila entre 150 y 900° C. Durante esta etapa se pueden llevar a cabo las reacciones 17, 18 y 19.

En la zona de oxidación, debido a la presencia de oxígeno alimentado, ya sea como tal o a través de aire enriquecido, se llevan a cabo las reacciones de combustión (11, 12 y 13), controlando el proceso para que se lleve a cabo una

¹¹ Se conoce como pirólisis al proceso de descomposición a alta temperatura en ausencia de oxígeno



combustión incompleta, limitando la presencia de oxígeno; se obtiene gas de síntesis y escoria como residuo.

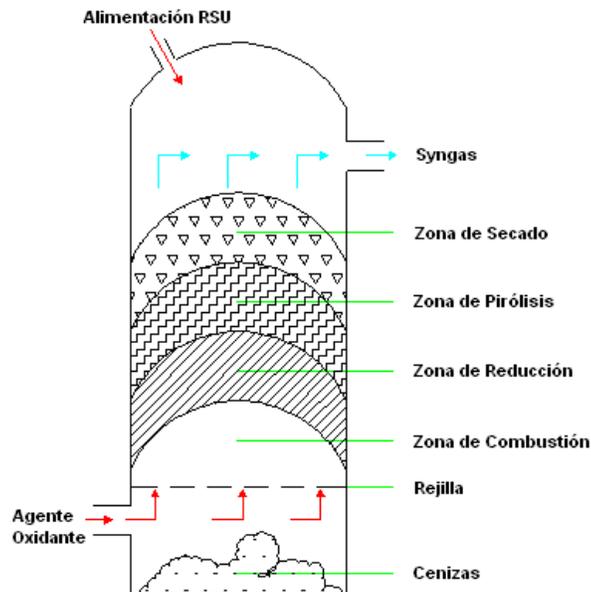


Figura 15. Esquema de las etapas durante la gasificación.

Control y/o limpieza de los gases producto. Durante la gasificación se produce CO , CO_2 , H_2 , NH_3 , N_2 , H_2S , Dioxinas y Furanos y cenizas volátiles. La gasificación no genera NO_x , debido a la atmósfera reductora, por lo que el nitrógeno presente en los RSU es transformado en pequeñas cantidades de cianuro de hidrógeno (HCN), NH_3 y N_2 . Asimismo el azufre presente en los RSU es transformado esencialmente en H_2S ; al final en el gas de salida no se encuentran SO_x , debido a que las altas temperaturas que maneja la gasificación los transforma en moléculas menos dañinas.

De esta forma para el control de las emisiones a la atmósfera y/o para la obtención de un gas de síntesis más limpio, se requiere de sistemas de control y limpieza

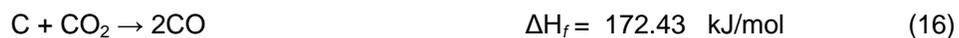


para los gases de salida del gasificador. Para la limpieza se mencionan los ciclones o filtros utilizados para captar las cenizas volátiles presentes en el gas de síntesis y para el control se mencionan los lavadores húmedos de gases, que capturan el NH_3 y el H_2S . Así, al final del proceso, el gas del síntesis producto es de alto valor energético y por lo tanto, comercial.

La alta temperatura en el gasificador convierte los materiales inorgánicos del combustible (cenizas y metales) en materiales vitrificados en forma de arenas de diferentes tamaños. Con algunos combustibles, es posible efectuar una concentración y recuperación de metales para su reuso. El material vitrificado, generalmente denominado escoria (*slag* en inglés), es inerte y tiene una variedad de usos en la industria de la construcción.

2.3.2 Reacciones características de la Gasificación

Aunque se dan más de mil reacciones químicas durante el proceso de gasificación, en resumen las principales reacciones con sus respectivos calores de formación (a 25°C) son las siguientes (OÑATE, 2006):

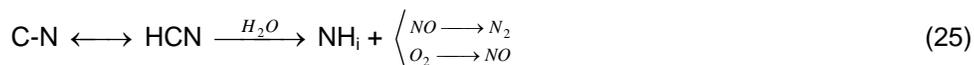




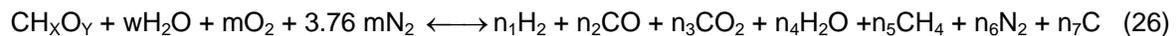
Adicionalmente se pueden establecer las reacciones en las que se encuentra presente el azufre; debido a la falta de oxígeno, en la gasificación no se forman SO_x (VALLE, 2006).



Las reacciones de los compuestos de traza de azufre y nitrógeno:



Siendo la reacción general para la gasificación de los RSU la siguiente (MOUNTOURIS, 2005):



La mayor parte del oxígeno inyectado al gasificador, ya sea como oxígeno puro o como aire, es consumido por las tres primeras reacciones, esto no significa que las demás reacciones no se lleven a cabo, pero se debe de recordar que la rapidez de reacción depende de la cinética y de los reactivos.

Muchas veces el vapor empleado en la gasificación es utilizado para proveer el calor necesario para el secado del combustible sólido, romper los enlaces químicos y aumentar la temperatura del reactor.

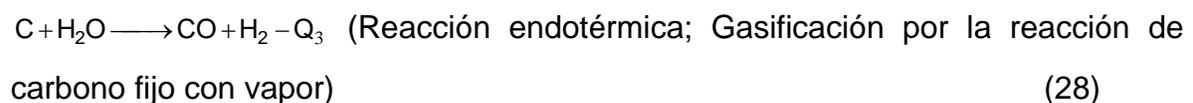
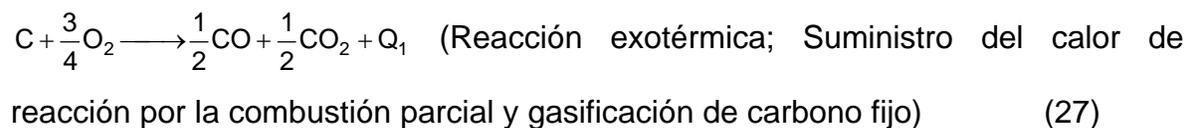


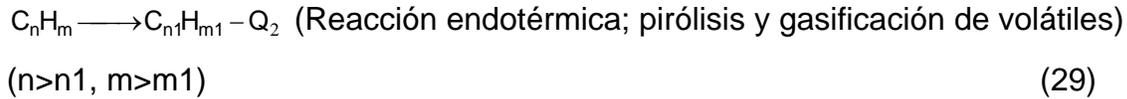
Las reacciones 14 y 15, conocidas como reacciones agua-gas, son las principales reacciones de gasificación, son endotérmicas y se favorecen a altas temperaturas y bajas presiones. La reacción 16, la reacción Boudourd, es endotérmica y es más lenta que la reacción de combustión (11) a la misma temperatura y en ausencia de un catalizador.

La reacción de hidro-gasificación (17) es muy lenta excepto a altas presiones. La reacción 18, reacción shift agua-gas, puede ser importante si se desea la producción de H₂. La producción óptima se obtiene a bajas temperaturas (arriba de 260°C) en presencia de un catalizador, y la presión no ejerce ningún efecto en el aumento de producción de hidrógeno.

La reacción 19, conocida como reacción de metanización, avanza lentamente a bajas temperaturas en ausencia de un catalizador.

La última reacción es neutral térmicamente, ya que sugiere que la gasificación puede llevarse a cabo si se le introduce un poco de calor pero la formación de metano, además es relativamente lenta en comparación a las reacciones 14 y 15 a menos que se añada un catalizador. Así, si se requiere hacer un balance de estequiométrico y de energía para cada de las reacciones propuestas, se tendría:





En condiciones normales, la cantidad de calor necesaria para pirolizar y gasificar los componentes volátiles presentes en la mezcla de reacción, a una temperatura comprendida entre 500 y 700° C, será solamente entre 5 y 10 veces la cantidad total de calor poseída por el residuo orgánico. Cuando el contenido de carbono fijo en el residuo orgánico es elevado (por ejemplo, un 20%), la combustión de todo el carbono fijo desarrollará una cantidad excesiva de calor. Al finalizar el proceso de gasificación, se obtiene un gas de síntesis rico en CO, H₂ y CH₄, el cual tiene un poder calorífico muy alto debido a que con este gas se pueden producir otros insumos de alto valor energético.

2.3.3 Tipos de gasificadores

Existen en el mercado una gran variedad de equipos de gasificación. Una clasificación de los gasificadores dictada por la Organización Latinoamericana de Energía; OLADE (OCHOA, 2001) se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de los gasificadores

VARIABLE	TIPO	CARACTERÍSTICAS
Según la fuente de energía para el proceso de gasificación	Alotérmico	Fuente externa de energía, es decir, que no sea el propio combustible.
	Autotérmico	La combustión parcial del combustible proporciona la energía para el proceso de gasificación.
Según la presión de operación en el gasificador	Baja presión	Gasificador que opera a presión atmosférica (ligeramente más alta a la presión atmosférica) o negativa (ligeramente más baja de la presión atmosférica).
	Alta presión	Trabaja con presión más alta que la



VARIABLE	TIPO	CARACTERÍSTICAS
		atmosférica. Usados en grandes instalaciones generando cantidades considerables de gas de síntesis.
Según el movimiento relativo de los gases y el combustible	Flujo concurrente	El combustible sólido y los gases generados se mueven en la misma dirección y, en general, hacia abajo (downdraft).
	Flujo contra-corriente	El combustible y los gases se desplazan en direcciones contrarias y, en general, los gases se mueven hacia arriba (updraft).
	Flujo Cruzado	Los gases generados se mueven transversalmente al flujo de combustibles (crossflow).
Según el régimen de flujo en el gasificador	Lecho fijo	Considerado por diversos autores como referencia a la zona de reacción fija en los gasificadores convencionales, en los cuales, se lleva el combustible sólido a dicha zona.
	Lecho fluidizado	Cuando las partículas del combustible se mantienen en suspensión en un fluido.
	Flujo por arrastre	Cuando se mezclan las partículas del combustible con el agente de gasificación y la mezcla es inyectada en una cámara donde ocurren las reacciones.
En cuanto a la forma de cargar combustibles y de descargar cenizas	Intermitentes	Carga en grandes cantidades y descargar con los gasificadores inoperantes.
	Continuo o semi-continuo	La carga del combustible y la descarga de cenizas se hacen de manera continua o discreta y con el gasificador en operación, sin interferir en su desempeño.
En cuanto a la clase de comburente/agente gasificante	Oxígeno Aire Oxígeno/vapor Aire/vapor	

Una descripción más a fondo con respecto a los gasificadores de acuerdo al movimiento relativo de los gases y el combustible, se menciona en el Anexo 6.4.



2.4. Selección de la mejor opción en el tratamiento de los RSU

Con la finalidad de proponer la mejor alternativa de tratamiento de los RSU para los objetivos principales de este trabajo, se realizó una comparación de las principales características de cada uno de los procesos antes mencionados, para el tratamiento de los RSU, esta comparación se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación de las características de tres tratamientos para RSU

CONCEPTO	DIGESTIÓN ANAEROBIA	INCINERACIÓN	GASIFICACIÓN
Tipo de tecnología	Tratamiento biológico	Tratamiento térmico	Tratamiento térmico
Tipo de residuo que trata la tecnología	Fracción orgánica de los RSU (material fácilmente degradable)	Puede tratar cualquier tipo de RSU. Para estos procesos es mucho más eficiente que se encuentre libre de metales	Puede tratar cualquier tipo de RSU. Para estos procesos es mucho más eficiente que se encuentre libre de metales
Tiempo de retención	Se encuentra en un intervalo de 20-60 días. El tiempo dependerá del tipo de reactor	El tiempo de retención puede ser de 1-5 horas en la cámara primaria y mayor a 2 segundos en la cámara secundaria. El tiempo de residencia en la incineración, dependerá de la cantidad de materia a tratar	El tiempo de residencia de los RSU, dependerá de la cantidad de material alimentado al reactor, puede ser de unas cuantas horas.
Condiciones de alimentación	Los residuos deben de contener un alto contenido de humedad y debe de contener material fácilmente	El material de alimentación debe de tener una cantidad de humedad menor al 50%. Para una mejor eficiencia y un	Las características del material alimentado, dependerán del tipo de reactor, ya que hay reactores que



CONCEPTO	DIGESTIÓN ANAEROBIA	INCINERACIÓN	GASIFICACIÓN
	degradable, en algunos digestores se recomienda que el material no contenga muchos compuestos con celulosa.	menor tiempo de retención, el material alimentado debe de triturarse	requieren de un tipo de tamaño de residuo determinado, así como un contenido de humedad bajo.
Condiciones de operación	La DA se lleva a cabo a presión atmosférica, y el intervalo de temperaturas que maneja va de los 25°C a los 55°C	Las temperaturas de los reactores de incineración van de los 700°C a temperaturas por arriba de los 1650°C. Este tipo de tecnología emplea un exceso de oxígeno. Para temperaturas elevadas, se recomienda el uso de oxígeno puro	La tecnología de gasificación opera en un intervalo de temperaturas de 800-1,800°C y mediante el uso de plasma puede llegar a tener una temperatura de 5,000°C. La presión dentro del reactor, dependerá del tipo de reactor, así como de la calidad que se desea en el gas de salida. El reactor puede operar a presión atmosférica.
Subproductos generados	Se producen lodos que pueden ser utilizados como composta.	Se generan cenizas, residuos metálicos y tierra	Dependiendo del tipo de gasificador se puede generar <i>slag</i> , cenizas, y residuos metálicos
Gases generados	Los principales contaminantes que puede producir este tipo de tecnología son gases de efecto invernadero como son el CH ₄ y el CO ₂ , además de	Los gases considerados como dañinos al medio ambiente, generados mediante esta tecnología, son los gases como el CO ₂ , SO _x , NO _x , HCl, dioxinas y furanos. Además se produce vapor de agua	Se produce H ₂ S y gases de efecto invernadero como el CH ₄ y el CO ₂
Equipo adicional	Se requiere de prensas, para poder eliminar el exceso de agua de los lodos	Se requiere de equipo lavador de gases, así como filtros para retener partículas	Se requiere de equipo lavador de gases, así como filtros para retener partículas



CONCEPTO	DIGESTIÓN ANAEROBIA	INCINERACIÓN	GASIFICACIÓN
		arrastradas en la corriente del gas	arrastradas en la corriente del gas
Tipo de medio que es susceptible de ser contaminado con por el uso de la tecnología	<p>Aire: Puede ser una fuente de contaminación del aire, si no se opera adecuadamente el reactor, dejando escapar los gases de efecto invernadero como el CH₄.</p> <p>Suelo: La calidad del lodo resultante del reactor, dependerá de la calidad de la materia alimentada, puede llegar a contener trazas de metales pesados</p>	<p>Aire: Con la liberación de gases como el CO₂ y el CH₄ se contribuye al efecto del calentamiento global. Con la liberación de compuestos clorados como las dioxinas y los furanos.</p> <p>Suelo: Con la liberación de H₂S, SO_x, se puede llegar a originar lluvia acida, logrando afectar la composición original del suelo.</p>	<p>Aire: Con la liberación de gases como el CO₂ y el CH₄ se contribuye al efecto del calentamiento global.</p>
Daños a la salud	<p>Los lodos resultantes del proceso pueden contener trazas de metales pesados, así como otros compuestos tóxicos, que pueden llegar a ser consumidos de manera indirecta (ingesta de vegetales que estuvieron en contacto con los compuestos tóxicos)</p>	<p>La exposición prolongada a compuestos clorados como las dioxinas y los furanos pueden llegar a ser altamente dañinos para la salud de las personas, debido a que estas sustancias se consideran carcinogénicas</p>	<p>Debido a que la producción de dioxinas y furanos es nula en el reactor, la tecnología se considera como segura para la población</p>

FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo a la Tabla anterior, las tres tecnologías presentan grandes beneficios, sin embargo las características que presenta cada uno de ellos, son puntos de partida para su elección tomando en cuenta además los efectos sociales, ambientales y económicos que se van a desarrollar en el sitio de implementación.



Para evaluar dichos efectos asociados con los métodos de tratamiento de los RSU, se construye una matriz multicriterio; ya que es una herramienta utilizada para la toma de decisiones en base a factores cualitativos o a múltiples factores no homogéneos que intervienen en el suceso. Con ayuda de la matriz multicriterio, se puede tomar una decisión, sin embargo la bondad de dichas decisiones dependerá de la capacidad de valoración de cada persona, así como del seguimiento de la metodología de la propuesta.

Esta matriz toma como escenarios las posibles transformaciones que ocurren durante, o como consecuencia de la construcción, operación o abandono, mostrada en la Tabla 7. En la Tabla 8, se muestran los valores de menor impacto socio-ambiental resultado de la evaluación anterior. Para generar la matriz de evaluación de impactos, se consideraron valores que van de 0 (efecto muy adverso) a 4 (efecto muy benéfico), considerando los siguientes criterios:

Aceptación de la ciudadanía

- 4 = Aceptación total de la población
- 3 = Aceptación por la población, pero con algunas reservas
- 2 = Indiferencia
- 1 = Oposición por parte de la población
- 0 = Oposición total

Creación de empleos

- 4 = Tasa alta de generación de empleos diversificados
- 3 = Tasa baja de generación de empleos



2 = Solo para personal altamente calificado

1 = No existe creación de empleos

0 = Desaparición de empleos actuales

Tiempo de eliminación de los residuos

4 = Menos de 1 día

3 = Menos de un mes (días)

2 = Más de un mes

1 = Un año

0 = Más de 20 años

Generación de algún producto aprovechable

4 = Generación de un producto directamente comerciable en grandes cantidades

3 = Generación de un producto en baja escala

2 = Generación de un producto que requiere tratamiento para su comercialización

1 = Posibilidad de generación de algún producto, pero con infraestructura costosa

0 = No se genera ningún producto

Proliferación de fauna nociva

4 = No existe proliferación de fauna nociva

3 = Proliferación fácil de controlar

2 = Proliferación medianamente controlable

1 = Proliferación difícil de controlar

0 = Proliferación y migración no controlable

Generación de agentes patógenos

4 = No existen agentes patógenos

3 = La generación de agentes patógenos es controlable



2 = La generación de agentes patógenos es medianamente controlable

1 = La generación de agentes patógenos es difícil de controlar

0 = La generación de agentes patógenos no es controlable

Afectación a la salud de la población

4 = No existen daños directamente asociados

3 = Daños mínimos a la salud

2 = Daños a la salud no comprobados

1 = Afección moderada con efectos reversibles

0 = Daños irreversibles a la salud

Distancia al sitio de disposición

4 = El sitio de disposición se encuentra cerca de varias comunidades (<10 km)

3 = El sitio de disposición se encuentra cerca de algunas comunidades (10–20 km)

2 = El sitio de disposición se encuentra en los límites del estado (21 – 30 km)

1 = El sitio de disposición se encuentra entre dos estados (31 – 40 km)

0 = El sitio de disposición pertenece a otro estado (>40 km)

Necesidades de mantenimiento

4 = No necesita mantenimiento

3 = Mantenimiento mínimo

2 = Mantenimiento por operadores no calificados

1 = Mantenimiento por personal calificado

0 = Mantenimiento por operadores no calificados por largos periodos de tiempo

Generación de ruido

4 = No produce ruido

3 = Generación de ruido moderado dentro de las instalaciones



- 2 = Generación de ruido alto dentro de las instalaciones
- 1 = Generación de ruido moderado fuera de las instalaciones
- 0 = Generación de ruido excesivo fuera de las instalaciones

Generación de olor

- 4 = No se produce olor
- 3 = Olor moderadamente perceptible dentro de las instalaciones
- 2 = Olor excesivo dentro de las instalaciones
- 1 = Olor perceptible fuera de las instalaciones
- 0 = olor excesivo fuera de las instalaciones

Contaminación de corrientes de agua

- 4 = No existe contaminación
- 3 = El sistema cuenta con tratamiento de agua
- 2 = Las descargas contaminantes son despreciables
- 1 = El volumen de las descargas contaminantes generadas es mínimo
- 0 = Existe contaminación de agua por filtración

Contaminación atmosférica

- 4 = No hay emisión de gases
- 3 = Emisión de gases en niveles muy por debajo de lo estipulado en las normas
- 2 = Emisión de gases dentro de los niveles marcados por las normas
- 1 = Emisión de Gases por arriba de los límites máximos permisibles
- 0 = Producción excesiva de GEI y tóxicos

Contaminación del suelo

- 4 = No hay contaminación del suelo
- 3 = Las emisiones son despreciables



-
- 2 = El impacto es moderado y local
 - 1 = El impacto es moderado y regional
 - 0 = El impacto es irreversible con afectación local

Afectación a la estética del lugar

- 4 = El sitio de disposición está diseñado en armonía con los alrededores
- 3 = El sitio de disposición no afecta a la estética
- 2 = El sitio de disposición tiene un bajo impacto a la estética
- 1 = El sitio de disposición es moderadamente agresivo a la estética del lugar
- 0 = El sitio de disposición es totalmente agresivo a la estética del lugar



Tabla 7. Matriz de evaluación de impactos

RUBRO	CONSTRUCCIÓN			OPERACIÓN			CIERRE		
	Digestor	Incinerador	Gasificador	Digestor	Incinerador	Gasificador	Digestor	Incinerador	Gasificador
Aceptación de la ciudadanía				3	1	3			
Creación de empleos	3	4	4	3	4	4			
Tiempo de eliminación de los RSU				3	4	4			
Generación de algún producto aprovechable				3	1	4			
Proliferación de fauna nociva				3	3	3	3	3	3
Generación de agentes patógenos				3	4	4	3	4	4
Afectación a la salud de la población				3	0	3	4	4	4
Distancia al sitio de disposición				3	3	4			
Necesidades de mantenimiento				2	1	1			
Generación de ruido	2	2	2	3	2	2			
Generación de olor				2	3	3			
Contaminación de corrientes de agua	Superficial			2	3	3			
	Subterránea			4	4	4			
Contaminación del aire	Emissiones SO _x	2	2	2	4	2	4		
	Emissiones PST	2	2	2	4	4	4		
	Emissiones NO _x	2	2	2	3	1	4		
	Emissiones CO	2	2	2	2	2	2		
	Emissiones CO ₂	2	2	2	2	2	2		
	Emissiones CH ₄				2	4	3		
	Emissiones H ₂ S				3	3	3		
Emissiones Dioxinas y Furanos				0	2	0			
Contaminación del suelo				3	3	3			
Afectación a la estética del paisaje	1	1	1	3	3	3	1	1	1
Total	16	17	17	60	60	70	11	12	12



Tabla 8. Valores de impacto socio-ambiental

ETAPA	DIGESTOR	INCINERACIÓN	GASIFICACIÓN
Construcción	16	17	17
Operación	60	60	70
Cierre	11	12	12
Total	87	89	99

En este estudio se ha optado por un análisis de las tecnologías, utilizando los métodos de decisión multicriterio discreto “PROMETHE” (Preferente Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluations), los cuales se encuentran incluidos dentro del Software “*Decision Lab 2000*”. Estos métodos son un punto intermedio entre los métodos multicriterio basados en relaciones de dominancia, demasiado pobres y la complejidad derivada de las funciones de utilidad. Este método responde a la necesidad de construir un preorden parcial y completo tan rico como sea posible, ordenando las alternativas (siempre que sea posible) en un orden de preferencias decreciente, para obtener de esta forma la mejor alternativa de tratamiento de los RSU.

Para poder obtener un preorden claro, simple y estable de las alternativas de tratamiento de los RSU, se deben de proponer los pesos de cada uno de los criterios a comparar y de esta forma determinar el grado de importancia de cada uno de estos, con respecto de los demás. Estos valores pueden variar dependiendo del punto de vista de la persona que realice el estudio.



Tabla 9. Ponderación de los criterios

CRITERIO	PONDERACIÓN (%)	PONDERACIÓN EN PESO
Aceptación ciudadana	7	0,07
Creación de empleos	7	0,07
Tiempo de eliminación de RSU	10	0,1
Generación e algún producto aprovechable	5	0,05
Proliferación fauna nociva y generación de agentes patógenos	7	0,07
Afectación a la salud	7	0,07
Distancia al sitio de disposición	1	0,01
Necesidades de mantenimiento	1	0,01
Generación de ruido	4	0,04
Generación de olor	3	0,03
Contaminación de corrientes de agua superficiales	7	0,07
Contaminación de corrientes de agua subterráneas	7	0,07
Emisión de SO ₂	7	0,07
Emisión de NO _x	7	0,07
Emisión de CO y CO ₂	3	0,03
Emisión de CH ₄	2	0,02
Emisión de H ₂ S	3	0,03
Emisión de Dioxinas y Furanos	7	0,07
Contaminación de Suelo	5	0,05
Total	100	1

FUENTE: Elaboración propia

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante el empleo de los métodos PROMETHEE.

El método PROMETHEE I, va a permitir obtener un preorden parcial de las alternativas de los tratamientos de RSU. Se pueden observar en la Figura 16, las relaciones de superación establecidas por PROMETHEE I, en donde las flechas indican cuáles son dichas relaciones de superación y el sentido de las mismas. En el caso del Incinerador y del Digestor, las alternativas podrían parecer indiferentes ya que poseen aproximadamente el mismo flujo de entrada y salida. Cuando no es posible unir alternativas mediante el sistema de flechas, significa que son incomparables, como ocurre en el caso de Incinerador y Digestor.

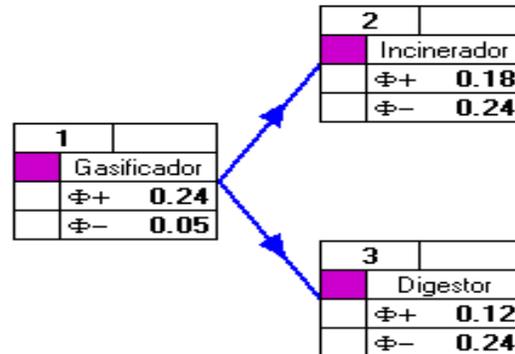


Figura 16. Orden preferencial parcial

Para poder solucionar la problemática de comparabilidad, se analiza el problema a resolver a través del método PROMETHEE II, que nos ofrece un orden de preferencia total, aunque se pierde el nivel de detalle del anterior método.

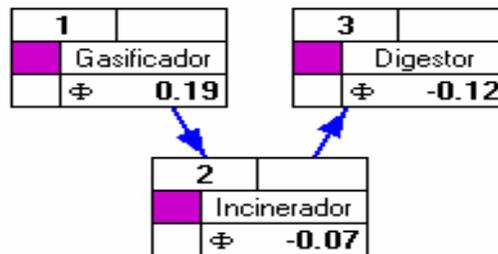


Figura 17. Orden preferencial total

Tomando en consideración el valor del flujo neto, también se puede comprender la magnitud con que una categoría supera a otra, como puede observarse en la Figura 17, en esta figura se puede apreciar como la tecnología de gasificación supera claramente al resto de las tecnologías, llegando a ser considerada como la mejor alternativa para el tratamiento de los RSU.



En el Software “*Decision Lab*”, se encuentra una herramienta denominada *Perfiles* (Profiles), esta herramienta es muy útil al tratar de visualizar las diferencias entre las distintas tecnologías para el tratamiento de RSU, esta herramienta presenta mediante un grafico de barras, los diferentes criterios introducidos en la selección de la mejor alternativa (en el eje de las abcisas), el valor que se encuentra en el eje de las “ordenadas”, indica cual es el valor calculado de ese criterio tomando en cuenta el valor introducido inicialmente en la calificación del criterio, así como la ponderación del mismo. La herramienta *Perfiles*, permite comparar dos alternativas al mismo tiempo, pudiendo de esta forma el observar de una manera más fácil las diferencias entre ambas tecnologías.

Como se puede constatar en la figura 18, en la tecnología de gasificación, se tienen muchos más valores positivos que las otras tecnologías, por lo que se puede concluir que, con la información que se tuvo disponible para la realización del presente trabajo, la tecnología de gasificación es la mejor alternativa para el tratamiento de los RSU.

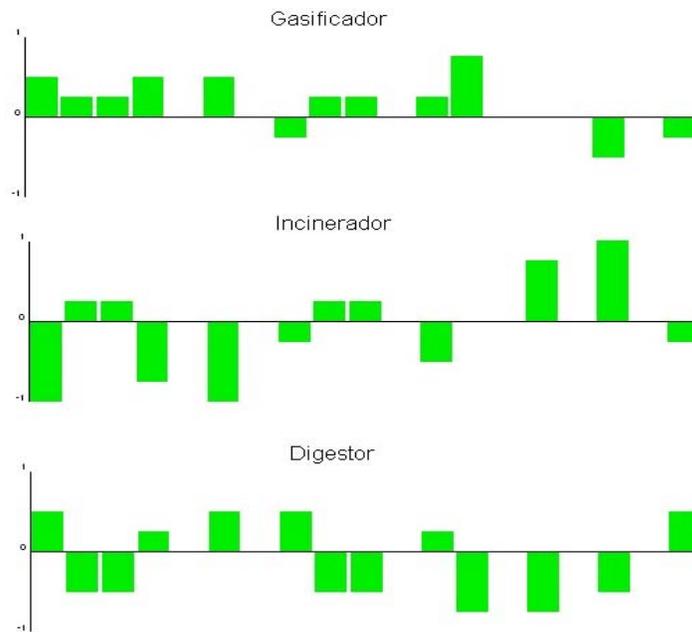


Figura 18. Perfiles de las tecnologías

Así entonces, la gasificación es una de las mejores propuestas para un adecuado tratamiento integral de los RSU, debido a su bajo impacto social, con respecto a los otros procesos, aunado de igual manera, al bajo impacto ambiental que representa. Desde el punto de vista económico, las opciones que presenta la tecnología de gasificación podría ser muy bien aceptadas, ya que ofrece la creación de empleos, la producción de compuestos comercializables, producción de energía eléctrica, entre otros beneficios.



3. BENEFICIOS DEL USO DE LA GASIFICACIÓN COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RSU EN MÉXICO

El procesamiento de RSU en general ha cambiado sustancialmente durante las dos décadas pasadas. La mayoría de los pequeños y mal controlados rellenos sanitarios han sido remplazados con unas pocas instalaciones de alta ingeniería pero más grandes y efectivas. Actualmente el procesamiento mediante la tecnología de gasificación, es una pieza fundamental del rompecabezas de los RSU, ofrece varios y grandes beneficios ambientales, sociales y económicos para México. Un ejemplo de esto es la capacidad de reducir los RSU en un 90% en volumen y un 75% en peso, todo esto está comprobado en países como España, Alemania y Canadá, en donde se han instalado plantas de gasificación de RSU, como alternativa a la reducción de estos y a su vez en la generación de insumos (como por ejemplo energía eléctrica), lo que ha dado grandes satisfacciones a estos países.

3.1. Experiencias del empleo de la tecnología de gasificación en el mundo

Algunos países europeos y americanos han comenzado a implementar el uso de la gasificación para el tratamiento de los RSU. Algunas de las compañías que ofrecen este tipo de tecnologías son PLASCO ENERGY GROUP INC., THERMOSELEC y ENECO, por destacar algunas, en la Tabla 10 se enlistan algunas de las empresas que ofrecen tecnología de gasificación para el tratamiento de los RSU. Estas empresas han instalado varias plantas que emplean gasificación y que a la larga, les han representado ventajas notables.



Tabla 10. Tecnólogos de Gasificación para el Tratamiento de RSU.

- Babcock & Wilcox Vólund
- Balboa
- Brightstar Enviromental
- Ebara
- Enerkem
- Foster Wheeler
- Global Energy
- Global Olivine
- Gurpo Hera
- IET
- Lurgi
- MTCI
- Novera Energy
- Nykomb Synergetics
- Phoenix Solutions Company & Plasma Energy Corporation
- The PyroArc Process
- Pyrogenesis
- Plasco Energy Group
- Retech Systems, LLC
- Solena
- Startech
- Thermogenics, inc
- Thermoselect
- TPS
- Von Roll Inova
- Waste to Energy
- Xerics

3.1.1 Experiencia operacional

Dentro de la información que proporcionan los tecnólogos en sus páginas electrónicas, se encuentra la cantidad de RSU, que han llegado a tratar estas empresas, así como el tipo de gasificador que han empleado en la reducción de los RSU; en la Tabla 11 se pueden apreciar algunos de estos datos, cabe destacar que estos datos sólo proporcionan una base en la planeación de una planta de gasificación de RSU, ya que estas compañías, se encargan del diseño en base a las necesidades del cliente.



Tabla 11. Comparación de tecnologías térmicas para el tratamiento de los RSU, por algunos tecnólogos.

EMPRESA	PLASCO ENERGY GROUP	THERMOSELECT	EBARA	PUROX	STARTECH
País	Canadá	Suiza	Japón	Estados Unidos	Estados Unidos
Tipo de gasificador	Plasma	Gasificación altas temperaturas	Lecho fluidizado	Lecho fijo	Plasma
Cantidad de RSU que trata (ton/día)	200	720	300	181	1000

FUENTE: Elaboración propia a partir de datos de tecnólogos

3.1.2 Emisiones

A nivel mundial los procesos de gasificación han alcanzado gran aceptación por la sociedad, debido a que la cantidad de gases de salida es más pequeño por tonelada de materia alimentada, comparada con la cantidad de gases de salida de un incinerador, además de que los gases de salida de un gasificador, debido a las condiciones en que se generan pueden ser tratados con diferentes tecnologías en comparación con los gases de combustión, los cuales son oxidantes.

Con la limpieza de los gases producidos en la gasificación (syngas), la emisión de azufre y óxidos de nitrógeno, precursores de la lluvia ácida, así como partículas provenientes del proceso son reducidos significativamente; por ejemplo PUROX quien alimenta a su gasificador RSU seleccionados, reporta la siguiente composición de gas de síntesis: 23.4 % de H₂, 39.1 % de CO, 24.4 % de CO₂, 5.47 % de CH₄, 4.93 % de alquitranes y 0.05 % de H₂S con una relación de 0.6 H₂/CO. A continuación, en la Tabla 10 se presentan los resultados de emisión reportados por algunos tecnólogos.



Tabla 12. Valores reportados sobre emisiones a la atmósfera para distintas empresas (mg/Nm³).

	PM	NO _x	CO	VOC	SO ₂	Dioxinas/ furanos (ng/Nm ³)	HCl	HF	Cd	Pb	Hg
Brightstar	1.6-10	40-96	440-625	0.05	<0.1	0.0331	<1.0	0.59	<0.0002	0.0051	-
Compact Power	0.11	26.49	7.13	0.49	3.37		0.17	-	-	-	-
GEM	3	262	8	6	79	0.02	4	ND	ND	-	ND
Thermoselect	0.84	21.76	2.95	-	0.16	0.0007-0.0011			0.001	0.013	0.0018
Thide	<3	-	<20	-	<4	<0.01	<10		-	-	-
TPS	3-7	200-300	2.5-5	-	5-15	0.013	0.6-2	<0.1	<0.004	0.005	0.008-0.05

Fuente: Tabla modificada de la obtenida en Comparison of AB 2770 and Conversión technology report, integrated waste management board, California State, USA. <http://www.ciwmb.ca.gov/agendas/mtgdocs/2005/04/00018424.doc>

En la siguiente Tabla (Tabla 13) se presentan los límites máximos permisibles en cuanto a emisiones de contaminantes se refiere reportados por algunos países.



Tabla 13. Límites máximos permisibles reportados por algunos países (mg/Nm³).

	PM	NO _x	CO	VOC	SO ₂	Dioxinas/ furanos (ng/Nm ³)	HCl	HF	Cd	Pb	Hg
Límites EUA EPA	18.4	219.8	89.2	-	61.2	-	29.1	-	0.01533	0.1533	0.0613
Límites Unión Europea	-	500	50	-	50	0.1	10	1.0	0.05	0.5	0.05
NOM México¹²	50	300	63	-	80	0.2	15	-	0.07	0.7	0.07
Límites Reino Unido	-	200	50	-	50	0.1	10	1.0	0.05	0.5	0.05

Tabla Modificada de la obtenida en: Comparison of AB 2770 and Conversion Technology Report, Integrated Waste Management Board, California State USA. <http://www.ciwmb.ca.gov/agendas/mtgdocs/2005/04/00018424.doc>

¹² Los valores presentados corresponden a la normatividad para incineradores, ya que la gasificación carece de marco legal en México.



3.2. Análisis del uso de la tecnología de gasificación en México

Utilizando el simulador “HYSYS” versión 2.4.1, se simuló un proceso de gasificación de RSU, empleando datos de composición y de la fórmula mínima para los RSU de la zona del Distrito Federal, ya que es en esta zona de la República Mexicana, en la que se genera una mayor cantidad de RSU al día.

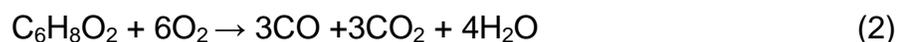
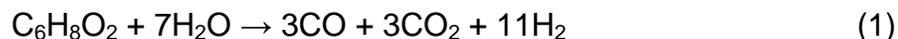
Debido a que el simulador tiene una base de fórmulas de compuestos establecidos, para el manejo de este programa, se tuvo que realizar una fórmula hipotética similar a la fórmula mínima de los RSU de la zona DF, combinando varios compuestos (ver Anexo 6.2).

La fórmula de los RSU zona DF: $C_{39.91}H_{59.83}O_{17.33}N$

Para poder realizar de una manera mucho más fácil el balance estequiométrico de las reacciones de gasificación, se debe simplificar la fórmula de los RSU, por lo cual se dividen los valores estequiométricos de todos los componentes entre 8.665 y se redondean a un dígito obteniendo la siguiente expresión: $C_5H_8O_2N_0$

Una vez obtenida la fórmula mínima de los RSU, se formó la molécula que fuera similar a la de los RSU en el simulador, llegando a obtener como fórmula mínima $C_6H_8O_2$, conformada por 1 molécula de CH=CH y dos moléculas de CH₃CO.

Una vez que se obtuvo la fórmula mínima se balancean las ecuaciones principales de la gasificación de los RSU, obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones:





Una vez que el sistema de ecuaciones ha sido introducido al programa, se procede a especificar las condiciones de las corrientes de alimentación al reactor, las cuales tienen las siguientes características:

En el programa se decide la temperatura a la que se desea operar el reactor, en este caso se eligió una temperatura de 1200° C; ya que se encuentra dentro del intervalo de temperatura que maneja la tecnología de gasificación.

Las corrientes de las que depende el sistema se pueden describir de la siguiente manera:

- RSU

Los RSU son la materia prima que se trata en este sistema, están constituidos principalmente por material de tipo orgánico que contiene cierto porcentaje de humedad propio del material.

- Inorgánicos

En esta corriente se consideran todos los materiales de tipo inorgánico que puedan contener los RSU, es decir todo aquel material que no aporte nada a las reacciones que se llevan a cabo dentro del reactor. Para este caso se introdujo al reactor únicamente hierro (Fe) como ejemplo.

¹³ El nitrógeno que se considera como participe en estas reacciones, es el introducido al reactor en la alimentación de aire



- Aire

La corriente de aire alimentada al reactor es una corriente rica en oxígeno, que tiene la finalidad de introducir al sistema la menor cantidad de N_2 posible. La cantidad de aire que se alimenta al gasificador, es la óptima para que se lleven a cabo las reacciones de gasificación y de esta manera obtener en la composición de los gases de salida una mayor cantidad de CO que de CO_2 .

Tabla 14. Condiciones operaciones de las corrientes de entrada del gasificador.

Corriente	Composición	Flujo	Temperatura	Presión
RSU	30% H_2O 70% RSU	30 ton/h	25° C	101.3 kPa
Aire	91% O_2 9% N_2	1 ton/h	25° C	200 kPa
Inorgánicos	100% Fe	1.26 ton/h	25° C	101.3 kPa

Se escogieron las mejores condiciones para la mayor producción de hidrógeno y una menor cantidad de dióxido de carbono.

- Syngas

Como parte de las corrientes que se obtienen después de la reacción se tiene la producción del syngas el cual contiene CH_4 , H_2O , H_2 , O_2 , N_2 , CO y CO_2 , este gas como se ha mencionado, después de un proceso de limpieza puede ser utilizado para la producción de energía y otros subproductos.

- Slag

En esta corriente se obtienen los materiales que no han participado en las reacciones de gasificación, tales como metales y cenizas. Estos materiales se funden dentro del reactor debido a las altas temperaturas y después se vitrifican obteniendo un sólido inocuo.



Ya que se han definido el sistema de ecuaciones, las corrientes y las condiciones de operación, se lleva a cabo la simulación, la cual arroja como resultado las ventanas que se muestran a continuación. En estas ventanas se puede apreciar la composición y las condiciones de las corrientes de salida.

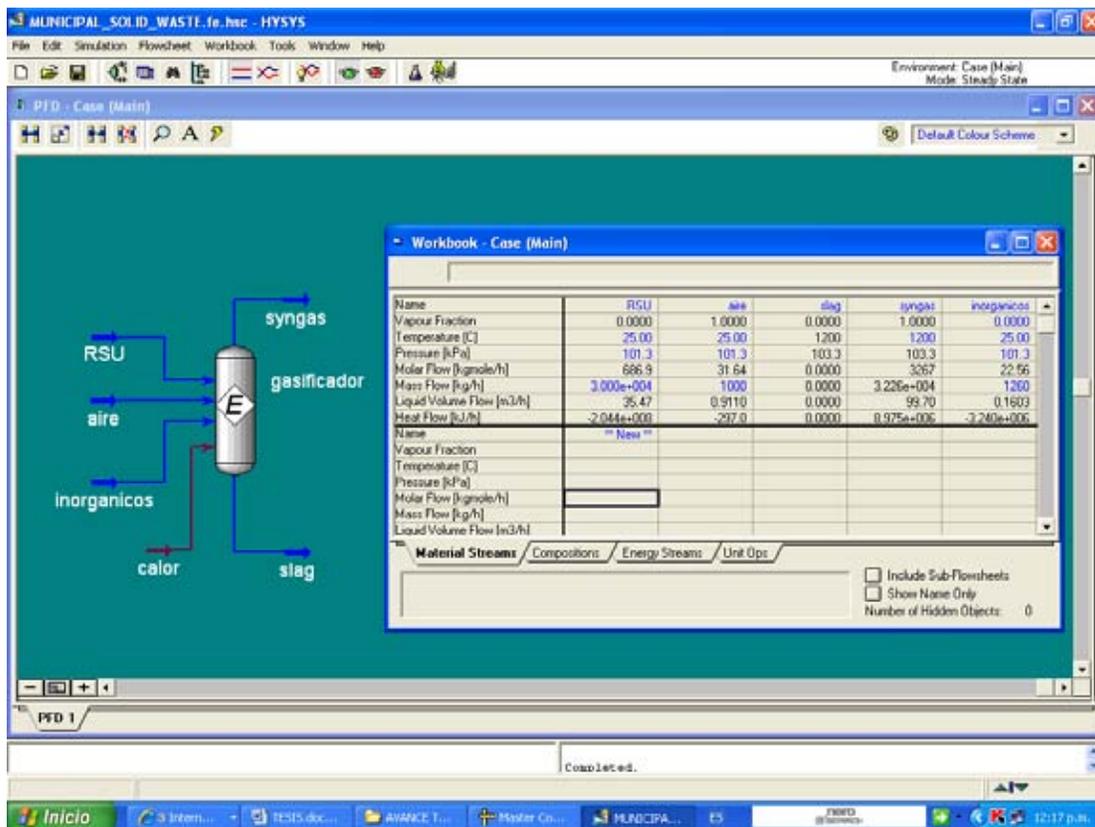


Figura 19. Pantalla en donde se muestra el resultado de la simulación.

En la Figura 19, se puede notar el tipo de reactor que se utilizó en la simulación, así como las corrientes que se especificaron para que se pudiera llevar a cabo la simulación del reactor en estudio, en la misma figura se presenta la ventana de condiciones de las corrientes de alimentación, así como las condiciones que calcula el simulador para las corrientes de salida.



Realizada la simulación correctamente, se puede consultar la composición de las corrientes de salida del reactor propuesto. Estas corrientes se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 15. Ventanas en donde se muestra la composición y las condiciones de las corrientes involucradas en el proceso.

Name	RSU	aire	slag	syngas	inorganicos
Comp Mole Frac (H2O)	0.7273	0.0000	0.0002	0.0024	0.0000
Comp Mole Frac (Methane)	0.0000	0.0000	0.0002	0.0028	0.0000
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0.0000	0.0000	0.0454	0.7031	0.0000
Comp Mole Frac (Oxygen)	0.0000	0.9000	0.0000	0.0000	0.0000
Comp Mole Frac (CO)	0.0000	0.0000	0.0186	0.2835	0.0000
Comp Mole Frac (CO2)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000
Comp Mole Frac (MSW*)	0.2727	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0.0000	0.1000	0.0001	0.0010	0.0000
Comp Mole Frac (Hierro*)	0.0000	0.0000	0.9356	0.0069	1.0000
Comp Mole Frac (Ammonia)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Name	** New **				
Comp Mole Frac (H2O)					
Comp Mole Frac (Methane)					
Comp Mole Frac (Hydrogen)					

Material Streams **Compositions** Energy Streams Unit Ops

Include Sub-Flowsheets
 Show Name Only
Number of Hidden Objects: 0



Workbook - Case (Main)

Name	RSU	aire	slag	syngas	inorganicos
Vapour Fraction	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
Temperature [C]	25.00	25.00	1200	1200	25.00
Pressure [kPa]	101.3	101.3	103.3	103.3	101.3
Molar Flow [kgmole/h]	686.9	31.64	0.0000	3267	22.56
Mass Flow [kg/h]	3.000e+004	1000	0.0000	3.226e+004	1260
Liquid Volume Flow [m3/h]	35.47	0.9110	0.0000	99.70	0.1603
Heat Flow [kJ/h]	-2.044e+008	-297.0	0.0000	8.975e+006	-3.240e+006
Name	** New **				
Vapour Fraction					
Temperature [C]					
Pressure [kPa]					
Molar Flow [kgmole/h]					
Mass Flow [kg/h]					
Liquid Volume Flow [m3/h]					

Material Streams | Compositions | Energy Streams | Unit Ops

Include Sub-Flowsheets
 Show Name Only
 Number of Hidden Objects: 0

En las tablas que el simulador presenta, la composición de los gases de salida se encuentra en fracción mol, sin embargo de esta forma no se tiene una buena apreciación de la cantidad de gases de salida, es por esto que se convierte la fracción mol en flujo másico, como se aprecia en la Tabla 16; en ésta misma se puede observar el flujo y las ppm que se pueden producir al tratar 720 ton/día de RSU.

Tabla 16. Composición, flujo y ppm de la corriente de salida de Syngas.

	Fracción mol	Flujo (kmol/h)	Flujo (kg/h)	ppm al día
H ₂ O	0.002	7.786	140.141	20.618
CH ₄	0.003	9.083	145.331	24.054
H ₂	0.703	2280.856	4561.713	6040.090
O ₂	0.000	0.000	0.000	0.000
CO	0.284	919.674	25750.872	2435.451
CO ₂	0.000	1.298	57.094	3.436
N ₂	0.001	3.244	90.832	8.591



Se puede apreciar que para las condiciones específicas de la simulación, se produce una mayor cantidad de H_2 y CO , así como una producción mínima de CO_2 ; cabe señalar que los gases generados por la gasificación, no serían liberados directamente a la atmósfera, estos deben de pasar primeramente por un sistema de limpieza de gases, para cumplir con la normatividad y con la intención de tener un sistema integral de reducción de RSU. Los gases de salida del gasificador, cuentan con un amplio mercado, para su transformación, por lo que se consideran productos principales del sistema.

3.3. Estimación de costos para la construcción de una planta de tratamiento de RSU por gasificación

Para la realización de un proyecto, lo primero es la obtención del terreno, así como suministrar una gran cantidad de dinero para la compra e instalación de la maquinaria y equipo necesario ya que la Planta debe ser completamente construida con tuberías, controles y todos los servicios. Además se debe contar con el dinero necesario para los pagos relacionados con la operación de la Planta.

Es por esto que se debe de contar con un marco teórico, que nos oriente sobre el capital con el que se debe de contar para la implementación de la propuesta.

En este apartado, los costos estimados para la construcción de una planta de tratamiento de RSU mediante la tecnología de gasificación de 720 ton/día, están basados en los costos de una Planta de gasificación de tecnología de lecho fluidizado, con una capacidad de tratamiento de 10 ton/día de RSU. El escenario considera un sistema para generara energía eléctrica y uno de producción de agua caliente.



3.3.1 Capital total de inversión

Para calcular el capital total de inversión (capital fijo + capital circulante) se consideran los siguientes porcentajes (contribución) para cada uno de los rubros, que se deben de tomar en cuenta para el cálculo del capital total de inversión:

Tabla 17. Contribución de cada rubro en el capital total de inversión.

Rubros	Porcentaje %
Costos directos (incluyendo el costo del equipo)	62.7
Costos indirectos	25.3
Capital circulante	10.0
Estudios de impacto ambiental	2.0
Capital total de inversión	100.0

Empleando los datos conocidos para una planta de tratamiento de 10 ton/día de RSU se hace una estimación de los costos para procesar 720 ton/día empleando la Regla de los seis decimos:

$$C_x = C_{CON} \left(\frac{Cap_x}{Cap_{CON}} \right)^{0.6}$$

En donde:

C_x = Costo calculado

C_{CON} = Costo del equipo de referencia

Cap_x = Capacidad del equipo a estimar



Cap_{CON} = Capacidad del equipo de referencia

A continuación se presentan los costos obtenidos.

► **Costos Directos**

Los costos directos incluyen:

- compra, levantamiento e instalación del equipo,
- instalación y pintado de tubería,
- equipo y material eléctrico (energía y luz),
- instrumentación y control,
- edificios y estructuras de proceso,
- mejoras al terreno,
- servicios (plantas de vapor, agua, aire y servicios de contraincendio) y
- compra del terreno

► **Costos Indirectos**

Dentro de estos costos se encuentran:

- la ingeniería y supervisión,
- gastos de construcción,
- honorarios a contratistas y
- un fondo para imprevistos



► **Capital Circulante**

Este capital circulante consiste en la cantidad total de dinero invertido en materias primas, y el suministro en el almacén, producto terminado en existencia y productos en el proceso de ser terminados, las cuentas por cobrar, efectivo para gastos mensuales de costos de operación, tales como salarios, compra de materia prima, y pago de impuestos.

► **Estudios de Impacto Ambiental**

El costo total de los estudios de impacto ambiental y los estudios HAZOP se estima alrededor del 2% del capital total de inversión.

► **Cálculo del capital total de inversión**

Considerando todos los rubros anteriores, así como el porcentaje de contribución que tiene de cada uno de estos, se realizó el cálculo del capital total de inversión, el cual se presenta en la Tabla 18, en donde se compara con el costo de planta que se tomó como base para realizar la estimación de la planta de gasificación propuesta.



Tabla 18. Calculo del capital total de inversión

Rubros	US\$ 10 ton/día*	US\$ 720 ton/día
Costos directos (incluyendo el costo del equipo)	3,395,480.00	44,187,626.52
Costos indirectos	1,368,754.00	17,812,500.90
Capital circulante	541,390.00	7,045,466.07
Estudios de impacto ambiental	108,278.00	1,409,093.21
Capital total de inversión	5,413,902.00	70,454,686.70

*Valores que se tomaron como base para la estimación de costos. Reportados por Keith (2004).

Tomando en cuenta el valor de la inflación que ha habido de julio del 2004 a enero del 2008 (15.71%), el valor del capital total de inversión sería de US\$81,142,662.67.

Con los valores reportados por algunos tecnólogos, se puede estimar el costo de la implementación de una planta con capacidad de 720 ton/día de RSU, con su tecnología y así tener un panorama más amplio de los gastos asociados a la implementación de la tecnología de gasificación. Estos valores se indican en la Tabla 19.



Tabla 19. Costos de algunas plantas de gasificación reportadas y una estimación de la planta propuesta.

Tecnólogo	Capacidad Reportada (ton/día)	Costo Reportados (US\$)	Capacidad Propuesta (ton/día)	Costo de la Planta (US\$)
Propuesta	10	5.413.902,00	720	81.142.662,67
XERICS	500	85.363.636,40	720	106.240.572,56
Plasco Energy Group	75	27.000.000,00	720	104.888.168,96
Grupo Hera	164	49.818.181,80	720	121.026.663,92
StarTech	1000	100.000.000,00	720	82.110.651,47

3.4. Beneficios ambientales

Por causa de los residuos el ambiente siempre resulta más afectado que cualquier otro ámbito, debido a esto se encadenan toda una serie de problemas que pueden ser evitados o atenuados al tener una gestión integral para los residuos sólidos la cual incluya tecnologías como la de gasificación que tienen beneficios extras a los que la gestión integral puede ofrecer.

3.4.1 Gestión integral de los RSU y reciclaje

Al implementarse programas para el buen uso o manejo de los RSU, se llevan a cabo programas más exhaustivos de reciclaje, los cuales se convierten en programas integrales del manejo de RSU (Gestión Integral de RSU), dando como resultado que una menor cantidad de RSU se envíe a los sitios de disposición final.



La Gestión Integral de los RSU es el conjunto de actividades interdependientes y complementarias entre sí, que conforman un proceso de acciones para la administración de un sistema que comprende: generación, disposición inicial selectiva, recolección diferencial, transporte, tratamiento, transferencia, manejo y aprovechamiento de los RSU. Dicha gestión integral se concentra en lo siguiente:

- A) Conservar recursos naturales.
- B) Ahorrar energía.
- C) Disminuir la generación de RSU a través de los tres principios fundamentales: reducir, reutilizar y reciclar.

Con el reciclaje se consigue disminuir la cantidad de RSU a disponer, dando como resultado una disminución de los RSU de un 30% o mayor del total de los RSU generados, esto depende en gran medida de factores sociales, sin embargo en algunos países, se ha logrado reciclar (recuperar, reciclar y compostear) hasta un 35% de los RSU totales que se generan.

Implementando programas integrales de manejo y disposición de RSU en nuestro país, alcanzando una educación adecuada en materia ambiental, así como la toma de conciencia de la población del buen manejo de los RSU, se pueden aprovechar hasta 12,384 miles de toneladas al año de RSU en el país, considerando un 35% de reciclaje de los RSU generados. En la Tabla 20, se presenta una comparación relativa a la disminución de RSU que se obtendría de acuerdo a la cantidad generada por Entidad Federativa en el 2005.



Tabla 20. Tabla comparativa de la disminución de RSU con el reciclaje tomando en consideración lo reportado por el INEGI para el año 2005 (35% de reciclaje del total de RSU)

Entidad federativa	Sin reciclaje ton/día	Con reciclaje ton/día
Aguascalientes	896	582
Baja California	3219	2092
Baja C. Sur	460	299
Campeche	614	399
Coahuila	2195	1426
Colima	485	315
Chiapas	2885	1875
Chihuahua	3285	2135
Distrito Federal	12466	8103
Durango	1249	812
Guanajuato	4340	2821
Guerrero	2351	1528
Hidalgo	1605	1044
Jalisco	6800	4420
México	16170	10510
Michoacán	2989	1943
Morelos	1474	958
Nayarit	726	472
Nuevo León	4800	3120
Oaxaca	2170	1410
Puebla	4241	2757
Querétaro	1381	898
Quintana Roo	964	627
Sn. Luis Potosí	1770	1150
Sinaloa	2389	1553
Sonora	2151	1398
Tabasco	1649	1072
Tamaulipas	2844	1848
Tlaxcala	745	484
Veracruz	5279	3432
Yucatán	1395	906
Zacatecas	951	618



Como se refiere en la tabla anterior, la cantidad que se puede reutilizar es muy grande, logrando que una cantidad relativamente menor de RSU, sea enviada a disposición final, disminuyendo problemas asociados a su transporte, manejo y disposición final como son los gastos, la disponibilidad de espacio, entre otros.

A pesar de la considerable reducción de RSU que se destinan para su disposición final mediante programas como la Gestión Integral de los RSU, la cantidad remanente es aun muy grande, por lo que se requieren de tratamientos alternos que ayuden en su reducción. Sin embargo la instalación de tratamientos alternos como es el caso de la gasificación, debe ser evaluada, considerando cuales son las comunidades o Estados que presentan una problemática crítica en cuanto a la disposición de sus RSU; un ejemplo muy claro en nuestro país es el Distrito Federal y su zona metropolitana (Estado de México).

En la Tabla 21 se presenta un cálculo estimando el número de gasificadores de 720 ton/día, necesarios para el tratamiento de los RSU por Entidad Federativa, considerando los datos de generación de RSU del 2005, así como para dos escenarios considerando un porcentaje de reciclaje de RSU de 35 y 50 %.

Tabla 21. Número estimado de Gasificadores requeridos (capacidad 720 ton/día) por Entidad Federativa para varios escenarios.

Entidad federativa	No. De gasificadores necesarios sin reciclaje	No. De gasificadores necesarios con reciclaje del 35%	No. De gasificadores necesarios con reciclaje al 50%
Aguascalientes	1	1	0
Baja California	4	3	1
Baja C. Sur	1	0	0
Campeche	1	1	0
Coahuila	3	2	1
Colima	1	0	0
Chiapas	4	3	1
Chihuahua	5	3	1
Distrito Federal	17	11	6



Durango	2	1	1
Guanajuato	6	4	2
Guerrero	3	2	1
Hidalgo	2	1	1
Jalisco	9	6	3
México	22	15	7
Michoacán	4	3	1
Morelos	2	1	1
Nayarit	1	1	0
Nuevo León	7	4	2
Oaxaca	3	2	1
Puebla	6	4	2
Querétaro	2	1	1
Quintana Roo	1	1	0
Sn. Luis Potosí	2	2	1
Sinaloa	3	2	1
Sonora	3	2	1
Tabasco	2	1	1
Tamaulipas	4	3	1
Tlaxcala	1	1	0
Veracruz	7	5	2
Yucatán	2	1	1
Zacatecas	1	1	0

Mediante el proceso de gasificación, es posible remover cantidades mayores a 720 toneladas de RSU por día de un relleno sanitario eliminando los problemas asociados: acumulación, formación de lixiviados, generación de metano y producción de otros contaminantes transportados por el aire (polvo, cloruros complejos, entre otros). Algunos de los beneficios ambientales que conlleva el empleo de la tecnología de gasificación se mencionan a continuación.



3.4.2 Al suelo

El tener grandes cantidades de residuos en los suelos hace que la mayoría de los ciclos biogeoquímicos de los que dependemos se interrumpan o se vean afectados. Cuando se logra que los RSU no lleguen a los suelos por medio de una adecuada disposición final de los RSU, como la tecnología de gasificación, este fenómeno puede ser evitado.

De igual manera la instalación de plantas de gasificación, se evita que una gran cantidad de RSU (que no pueden ser reciclados por su naturaleza o por la forma en que se encuentran), sea conducida a sitios de disposición final como son los rellenos sanitarios, los tiraderos a cielo abierto o tiraderos clandestinos, ayudando así a la naturaleza a que no tarde hasta miles de años en asimilarlos nuevamente, disminuyendo de esta forma los problemas asociados a los mismos como son la contaminación del suelo y la formación de lixiviados.

El proceso de gasificación permite que los RSU sean tratados en muy poco tiempo evitando de esta forma que lleguen a sitios de disposición final inadecuados o inconvenientes. Al tratar los RSU casi en un tiempo no muy prolongado al tiempo de generación de los mismos, se evita que la materia orgánica que estos contienen se degrade completamente evitando de esta forma la generación de GEI y de lixiviados. En la Tabla 22 se indican los tiempos de degradación de los diferentes materiales que componen a los RSU, los cuales se evitan al ser tratados los RSU mediante gasificación.



Tabla 22. Tiempo de degradación de algunos materiales.

Material	Tiempo de degradación
Plato de Cartón	1 mes
Algodón	de 1- 5 meses
Bote de hojalata	8 años
Filtro de Cigarro	De 15 a 35 años
Envase Multicapas	De 35 a 50 años
Lata de aluminio	Más de 200 años
Pañal desechable	Más de 300 años
Toalla Sanitaria	Más de 300 años
Vaso de unicell	Más de 500 años
Periódico	Unas semanas
Zapatos de cuero	Hasta 50 años
Plástico fino	Hasta 5 años
Bolsas Plásticas	10-20 años o incluso cientos de años, dependiendo del tipo de plástico
Botellas plásticas	Cientos de años
Fragmentos de vidrio	Hasta miles de años

FUENTE: Elaboración propia

Al usar esta tecnología en conjunto con una gestión integral de los residuos, se puede lograr que a los rellenos sanitarios solo lleguen los residuos de tipo orgánico que se degradan en tiempos muy cortos y que en lugar de afectar al suelo funcionan como nutrientes para este.

Como se puede apreciar con ayuda de la simulación en HYSYS del proceso de gasificación, se logra la eliminación de una gran cantidad de materia, llegando a alcanzar hasta un 90% del volumen de RSU alimentados al reactor, teniendo como material sólido a la salida del reactor cenizas y materiales que no pueden ser eliminados por este medio como son los metales o el vidrio. Existen reactores de gasificación, en donde se obtiene material vítreo (slag) el cual, según algunos tecnólogos, puede tener varios usos principalmente en el ramo de la construcción.



Con la implementación de la tecnología de gasificación se evita que una gran cantidad de terrenos (varias hectáreas), sean deforestados y sean expuestos a los efectos de los vientos y de las lluvias (sufran erosión), para destinarlos a la disposición de los RSU. De esta forma se podría llegar a suplantar los sitios de disposición final, clausurando los sitios que en la actualidad han llegado a su límite o que en pocos años lo harán. Los sitios susceptibles a ser clausurados se pueden destinar para su reforestación o para crear centros de recreación, siempre y cuando se cumpla con las medidas correctas de clausura. Si de alguna manera no es posible suplantar los rellenos sanitarios por la tecnología de gasificación, por lo menos la cantidad de RSU enviados a estos sitios sería mucho menor, por lo que la demanda de espacio disponible disminuiría teniendo como consecuencia que el tiempo de vida útil de estos lugares se incremente y se reduzca la búsqueda de nuevos espacios para la instalación de rellenos sanitarios o similares.



Figura 20. Comparación entre un relleno sanitario y una planta de gasificación de RSU



3.4.3 Al agua

Como se sabe el agua es de vital importancia tanto para el humano como para los ecosistemas, al contaminarse esta fuente se acarrearán grandes problemas, como el de la fermentación por bacterias que hacen que el agua sea turbia y tenga un olor fétido o a ácido sulfhídrico y metano, así como una producción excesiva de algas que evita que se reproduzcan los peces o mueran; al tener tecnologías como la gasificación para la disposición adecuada de RSU estos problemas pueden ser aminorados.

En el Capítulo 1, se mencionó que los cuerpos de agua (ríos, lagos, entre otros), se ven seriamente contaminados tanto por los lixiviados que producen los RSU, como por su inadecuada disposición. Sin embargo estos problemas son susceptibles de ser disminuidos o evitados mediante el tratamiento de los RSU por tecnologías de gasificación, ya que los RSU son tratados en el menor tiempo posible y como se ha mencionado anteriormente no hay formación de lixiviados, que lleguen a alcanzar los cuerpos de agua cercanos.

Con el almacenamiento y tratamiento correcto de los RSU, se evita que estos sean arrastrados hasta los cuerpos de agua (ríos, lagos, lagunas y mares) por la acción de los vientos o de las lluvias; la poca o nula presencia de RSU en estos lugares beneficia a los ecosistemas que sostienen estos sitios y los que dependen de ellos. Por ejemplo cuando en el agua se encuentra presente materia orgánica proveniente de los RSU se degrada ocasionando que el oxígeno disponible en el agua disminuya, afectando la flora y fauna que habitan en ella; si se evita que los RSU lleguen hasta los cuerpos de agua, las perturbaciones antes mencionadas, se ven aminoradas.



De igual manera al lograr que la basura no llegue a los cuerpos de agua mencionados se evita que ésta quede suspendida evitando la fotosíntesis de las plantas acuáticas y así también, que se alteren las redes alimenticias que se dan en este medio.

Dentro de los principales beneficios que se obtienen con la implementación del tratamiento adecuado de los RSU, se consigue que una menor cantidad de agua sea contaminada por la presencia de RSU, aumentando la cantidad de agua que puede ser destinada al consumo humano. Además de tener mayor cantidad de agua disponible para consumo humano también se impide la contaminación del agua destinada para el sector agrícola, la cual en muchos lugares es reducida por situaciones como esta.



Figura 21. Ejemplo de uno de los beneficios ambientales, con el cambio de hábitos y costumbres de las personas con la implementación de una gestión integral de tratamiento de RSU empleando Gasificación.

Así también este proceso a diferencia de otros no utiliza grandes cantidades de agua para el mismo, además la poca cantidad de agua que se llega a utilizar



puede tratarse y reusarse de nuevo en el ciclo del proceso, ya que no es contaminada: de esta manera no se tienen que utilizar grandes cantidades de agua que en otras situaciones puede llegar a convertirse en desecho.

Finalmente, se destaca que un efecto benéfico de un gestión íntegral, incluyendo la gasificación, de los RSU sobre el factor agua, es evitar que se contaminen cuerpos naturales de agua en los que se llevan actividades económicas como la pesca, de la cual dependen muchas familias en México; además de prevenir la muerte de los peces se impide la propagación de enfermedades tanto por el consumo de esta agua como por el de fauna que habita en estos medios contaminados.

3.4.4 Al aire

La gasificación produce de 1/5 a 1/3 del volumen de gas que llega a producir un incinerador (Larson, 1996). Mientras que en un incinerador los productos de la combustión después de ser limpiados son arrojados a la atmósfera, los gases que se producen en la gasificación nunca se arrojan a la atmósfera sino que se limpian y se les da un tratamiento para producir energía o algún subproducto químico con valor en el mercado.

Los beneficios que trae el empleo del tratamiento de los RSU mediante gasificación, al aire, se deben principalmente a que uno de sus objetivos principales es el aminorar y casi erradicar, el desprendimiento de gases tóxicos o de efecto invernadero a la atmósfera tales como CH₄, CO₂, NO_x, SO_x, dioxinas y furanos, mediante el tratamiento térmico de los RSU. Esto se logra principalmente debido al intervalo de temperaturas que maneja la gasificación (800° - hasta más de 1900°C) lo cual, por ejemplo, evita se formen los precursores de las dioxinas y



los furanos. Este es uno de los aspectos más importantes, que se debe de tener muy en cuenta, ya que actualmente se han visto las consecuencias en el mundo por el calentamiento global.

Como ya se mencionaba, la gasificación ayuda a reducir el volumen de RSU, que son enviados a los sitios de disposición final, esto trae el beneficio de la reducción de emisiones de metano, producidas mediante la degradación de los materiales, así como la generación de olores desagradables producto de la misma degradación. De igual forma se evita el riesgo de conatos de incendio provocados por la alta producción de gases flamables no controlados (CH_4) y así mismo se evita o disminuye la formación de compuestos tóxicos como son las dioxinas, los furanos, NO_x , SO_x y CO_2 .

Otro de los beneficios ambientales que se desprenden del uso de la gasificación es que debido a que no se realiza una combustión completa de los RSU la formación de CO_2 es mínima y por el contrario hay una abundante formación de CO; como se puede apreciar en la simulación realizada en HYSYS, la relación de CO_2/CO es de 0.0022, este resultado es muy importante ya que el CO es mucho más fácil de asimilar por la naturaleza que el CO_2 , además de que no es un participante directo en el denominado "calentamiento global". El CO, es considerado como un compuesto altamente toxico en grandes cantidades, sin embargo, en el proceso del tratamiento de RSU por gasificación, este gas es recuperado, ya que existe un amplio mercado para este compuesto, principalmente en la formación de productos químicos orgánicos, tales como ácido acético, fosgeno (el cual interviene en la fabricación de poliuretano) y ácido fórmico. Por ejemplo: para la producción de ácido acético aproximadamente se usan 500 kton/año de CO (HIGMAN, 2003). Tomando en cuenta lo anterior, con los resultados obtenidos de la simulación realizada para el tratamiento de 720 ton/día de RSU se podría tener una producción aproximada de 227 kton/año de



CO, susceptibles de ser recuperados mediante un sistema especial de limpieza para este gas, el cual después podría ser almacenarlo y finalmente enviarlo a una pequeña planta de producción de ácido acético consiguiendo grandes beneficios ambientales al no ser arrojado a la atmósfera.

Como se ha mencionado con anterioridad, mediante el empleo de la gasificación, se disminuye la producción de CO₂. A pesar de que el CO₂ es parte esencial en los procesos vitales de las plantas y los animales tales como la respiración y la fotosíntesis, el exceso de la presencia en el medio ambiente de este gas provoca efectos adversos como es el caso del calentamiento global.

Con la baja generación de CO₂ y mediante un sistema adecuado de secuestro de este gas, (Anexo 6.5), en el sistema de limpieza del gas de síntesis, se impide que se generen alteraciones en el medio ambiente (efecto invernadero), así como daños a la salud (asfixia) y del mismo modo se ayuda a la mitigación del cambio climático. El CO₂ recuperado se puede tratar para producir urea y comercializarlo en el mercado.

Con la nula o baja cantidad de SO_x y NO_x, producida por la gasificación, se disminuyen los fenómenos físicos causados por estos compuestos, como es el caso del efecto invernadero y la lluvia ácida y al mismo tiempo se disminuyen los deterioros al medio ambiente producidos por estos fenómenos, tales como el daño al follaje de las plantas, filtración en los suelos provocando acidificación del mismo llegando a afectar las raíces de las plantas y a otros seres vivos que viven en el suelo.



3.5. Beneficios sociales

Uno de los alcances principales en la implementación de una tecnología para el tratamiento de los RSU, siempre ha sido la búsqueda del bienestar social, en todos los aspectos posibles, que van desde la mejora visual y de higiene de los sitios de disposición de los RSU, la generación de empleos, hasta la mejora en la calidad de vida de la población.

Con el disfrute de tecnologías como la gasificación, se ejecutan programas integrales de manejo de RSU, los cuales consideran a la sociedad como el factor más importante, provocando cambios positivos como son: cambio de hábitos, costumbres, así como de conciencia del buen manejo de los mismos. Cuando la sociedad está conciente de los problemas que traen consigo los RSU y su mal manejo, comienza a preocuparse por lo que ocurre después de que se generan, facilitando así su tratamiento y aprovechamiento, obteniéndose el máximo beneficio, empezando desde el reciclaje hasta la producción de nuevos materiales con un valor agregado

La implementación de plantas de gasificación de RSU conlleva el beneficio de la creación de empleos, ya que se generan empleos desde su diseño, hasta la puesta en marcha de la Planta. La fuente de empleos que representa la implementación de una planta de gasificación, es muy basta, ya que en su construcción se requiere de personal de construcción, técnicos, ingenieros y arquitectos entre otros. En la puesta en marcha se requiere de personal para el área de pretratamiento, técnicos operadores, ingenieros, mecánicos, personal de limpieza, personal de vigilancia, también es requerido personal adicional que se encargue del traslado de los RSU a la planta de gasificación y personal que se encargue de la selección de los RSU.



Las personas que actualmente trabajan en los rellenos sanitarios o en los tiraderos, ya sea de forma legal o ilegal como es el caso de los “pepenadores”, podrían obtener un empleo fijo en las plantas de gasificación, con una mejor paga que la que le pueden ofrecer muchas veces los líderes de las asociaciones de pepenadores; los pepenadores podrían ver mejoradas en gran medida sus condiciones de vida, ya que al ser contratadas por una empresa o por el gobierno, firmarían un contrato laboral, con un salario determinado, los cuales además de un sustento económico estable, son beneficiados con prestaciones conforme a la ley y pueden acceder al servicio médico viéndose beneficiadas sus familias. Cuando las personas se incorporan a un sistema laboral “formal”, pueden llegar a acceder a programas de vivienda digna, mejorando su calidad de vida.

El personal empleado en las plantas de gasificación de RSU, laborarían bajo condiciones más seguras e higiénicas que las que pueden existir en un relleno sanitario o un tiradero, contando con seguro social y en ocasiones con seguro de vida.

El implementar plantas de gasificación facilita la desaparición de la llamada “mafia de la basura”, ya que la gente que trabaja en los sitios de disposición final pueden aspirar a mejores condiciones de vida, lo que implica que no tendrán que seguir vendiendo los materiales que recuperan de los RSU y los tengan que vender a un precio muy bajo a los líderes de las asociaciones de pepenadores, evitando de esta forma los cacicazgos que actualmente operan en los sitios de disposición final.



Figura 22. Condiciones de trabajo actual dentro de los rellenos sanitarios y condiciones de trabajo en una planta de gasificación de RSU.

Con sistemas de tratamiento de los RSU bien controlados como es el caso de la gasificación, se evita que fauna nociva, como ratas, cucarachas y perros, entre otros, se vean atraídos a estos lugares y su población crezca, evitándose de esta manera la propagación de enfermedades a la población. Esto se logra debido a que los tiempos de retención de los RSU, en las plantas de gasificación son muy cortos, evitando la generación de malos olores, que es la principal fuente de atracción de animales e insectos.

Dentro de los beneficios sociales que conlleva el uso de la gasificación para el tratamiento de los RSU, se encuentra el hecho de la producción de energía eléctrica a partir del gas de síntesis que se genera en la gasificación de los RSU, este punto pudiera parecer netamente económico, sin embargo se considera social tomando el punto de vista, que la energía producida puede abastecer a las poblaciones cercanas que carecen de electricidad, mejorando de gran manera la calidad de vida de los pobladores, evitando la combustión de combustibles fósiles y al mismo tiempo ayudando al ambiente.



La mejora del paisaje cuando se implementa el uso de plantas de gasificación para el tratamiento de los RSU, es muy evidente, ya que las plantas de gasificación generan una vista más agradable, que la vista proporcionada por un relleno sanitario o por un tiradero a cielo abierto, siendo por esta parte mejor aceptados por la población. El hecho de la instalación de una planta generadora de empleos cerca de una comunidad, que mejore el aspecto de la zona y que este enfocada al mejoramiento del medio ambiente puede provocar que los terrenos colindantes estos sitios, aumenten su valor catastral, lo que no sucede con el valor de los terrenos que se encuentran al lado de un tiradero o relleno sanitario, ya que la gente no quiere vivir cerca de estos lugares por los problemas de malos olores y la presencia excesiva de fauna nociva.

Por lo tanto podemos decir que el empleo de la tecnología de gasificación para el tratamiento de los RSU en nuestro país se considerar como un desarrollo sostenible, ya que esta tecnología nos ayuda a aumentar nuestra calidad de vida sin comprometer por ello la calidad de vida de las generaciones que nos sucederán. Esta tecnología pone en marcha sistemas de producción y de consumo con el menor impacto ambiental posible.

3.6. Beneficios económicos

El principal beneficio económico que tiene la implementación de plantas de gasificación para el tratamiento de los RSU, es la generación de productos con un alto valor agregado y mercado disponible tales como: el gas de síntesis (Syngas), algunos productos derivados de la limpieza de los gases como son el NH_3 y el H_2S , el material sólido, denominado “Slag” producido durante la gasificación y la generación de electricidad, entre otros. Un ejemplo de esto es el mencionado en los beneficios ambientales, en donde se menciona que con la captura de gases



como el CO y CO₂, se pueden destinar ya sea para la producción de ácido acético, fosgeno, ácido fórmico y urea. Otros compuestos como es el caso del NH₃ también pueden ser aprovechados, debido a que el amoniaco sirve como reactivo para la producción de urea ((NH₂)₂CO), la cual a su vez es requerida para la elaboración de fertilizantes. Actualmente su producción en México, es muy escasa ya que hoy en día el país cuenta con muy pocas industrias productoras de esta sustancia, como lo es PEMEX-Petroquímica, en donde sólo la petroquímica de Cosoleacaque en Veracruz, produce 600 mil toneladas al año.

Sin embargo la problemática radica en los altos costos de la materia prima en México para la producción de urea, por lo que el país ha tenido que importar la (NH₂)₂CO desde Ucrania y Rusia con un valor de hasta 385 dólares americanos por tonelada métrica. En este caso la gasificación podría ayudar a solucionar este problema, lo que reduciría la importación del producto viéndose beneficiados varios sectores de la población.

Por otro lado, el gas obtenido de la gasificación (syngas), puede ser empleado como combustible, ya que contiene gran cantidad de H₂ y CH₄ (lo cual depende de las condiciones de P y T a las que opera el gasificador), siendo éste de un costo más bajo del obtenido mediante combustibles fósiles. El syngas obtenido de la gasificación puede ser empleado también para la obtención de etanol o metanol.

Dentro de las múltiples opciones que nos ofrece la gasificación, para la generación de algún bien económico, se encuentra la producción de energía eléctrica a partir del gas de síntesis (syngas) empleando ciclos combinados. Los gases que se obtienen de la gasificación, son limpiados y después mandados a una turbina ciclada de gas/vapor donde se genera electricidad; La electricidad generada por los gases, proporciona la mayor parte de la electricidad que requiere la Planta de gasificación, la cual representa únicamente el 7% de la energía generada; con el



autoabastecimiento de energía eléctrica, se obtienen grandes ahorros económicos, por consumo de energía eléctrica. El restante 93% de energía generada es explotable ya que se puede vender a CFE o simplemente abastecer a comunidades cercanas a la Planta, generando grandes beneficios económicos a las familias a las que se les brinde el servicio, ya que por convenio, la única empresa que puede vender energía eléctrica es CFE, este servicio sería gratuito a la comunidad.

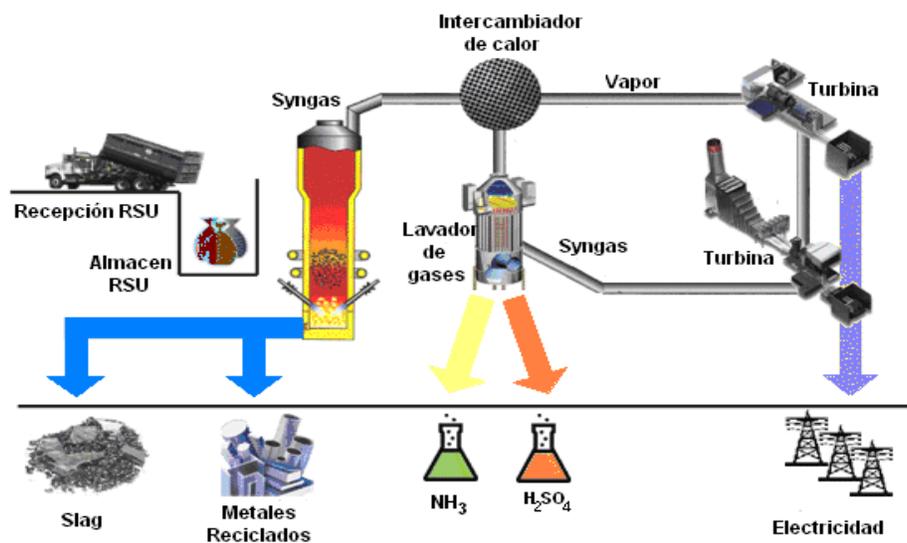


Figura 23. Insumos, que se pueden obtener mediante el empleo de la gasificación.

(Fuente: Recovered Energy, Inc)

Para dar un ejemplo de los beneficios económicos que presenta el tratamiento de RSU mediante tecnologías de gasificación, se puede hacer un estimado de la cantidad de energía que se puede obtener del tratamiento mediante gasificación en el país.



Considerando 1 tonelada de RSU en bruto, de cada una de las zonas de México, la recuperación potencial de energía sería la presentada en la Tabla 23, utilizando las ecuaciones del Manual “Municipal Solid Waste Management”, para la evaluación del potencial de recuperación de energía; en ésta misma tabla se muestra la energía eléctrica neta generada, empleando un ciclo combinado.

Tabla 23. Potencial de generación de energía eléctrica de los RSU

Zona	RSU	PCI	Recuperación potencial de energía eléctrica	Generación de potencia eléctrica	Eficiencia conversión del ciclo combinado	Generación total de energía eléctrica
	(ton)	(kcal/kg)	(MWh)	(MW)	(%)	(MWh)
Norte	1.00	2113.40	2,46	0.10	57.00	1,40
Centro	1.00	1712.40	1,99	0.08	57.00	1,14
DF	1.00	1898.90	2,21	0.09	57.00	1,26
SUR	1.00	1911.30	2,22	0.09	57.00	1,27

Cantidad total de RSU (ton) = B

Poder Calorífico Inferior (kcal/kg) = PCI

Recuperación potencial de energía (MWh) = $1.163 \times 10^{-3} * PCI * B$

Generación potencial de potencia (MW) = $4.8 \times 10^{-5} * PCI * B$

Eficiencia de conversión del ciclo combinado = 57 %¹⁴

Generación total de potencia (MW) = $2.74 \times 10^{-5} * PCI * B$

De los valores obtenidos, se puede alcanzar un estimado grueso, de la generación de energía eléctrica en nuestro país al mes tratando 720 ton/día de RSU por medio de la tecnología de gasificación (Tabla 24).

¹⁴ Valor reportado por la CONAE en su página web.



Tabla 24. Generación de energía eléctrica al mes mediante un ciclo combinado.

Zona	RSU (ton/día)	Energía Eléctrica (MWh/ton RSU)	Energía Eléctrica (MWh/mes)
Norte	720,00	1,40	30681,77
Centro	720,00	1,14	24860,16
DF	720,00	1,26	27567,72
SUR	720,00	1,27	27747,74

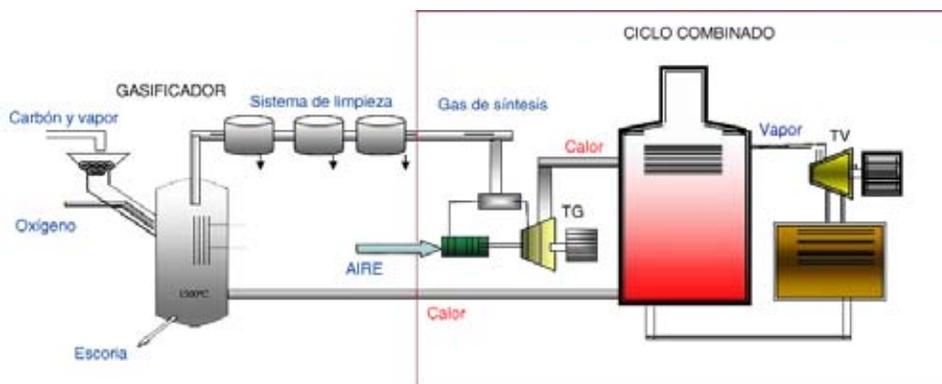


Figura 24. Esquema en donde se muestra un sistema gasificación con un ciclo combinado. FUENTE: Hiriart

Analizando las centrales de generación de energía eléctrica mediante ciclo combinado instaladas en México (Tabla 25), se puede notar que la generación de energía eléctrica utilizando los gases de salida del tratamiento de RSU mediante gasificación es considerablemente alta con respecto a la producida actualmente en las plantas instaladas en el país, lo que podría influir en un menor uso de combustibles fósiles para la generación de energía por ciclo combinado.



Tabla 25. Centrales eléctricas mediante Ciclo combinado en México y su capacidad efectiva

Nombre de la central	Capacidad efectiva instalada (MW/mes)	Ubicación
Hermosillo	227.0	Hermosillo, Sonora
Presidente Juárez (Rosarito)	496.0	Rosarito, Baja California
Gómez Palacio	200.0	Gómez Palacio, Durango
Samalayuca II	522.0	Cd. Juárez, Chihuahua
Chihuahua II (El Encino)	619.0	Chihuahua, Chihuahua
Huinalá	378.0	Pesquería, Nuevo León
Pdte. Emilio Portes Gil (Río Bravo)	211.0	Río Bravo, Tamaulipas
Huinalá II (Monterrey II)	450.0	Pesquería, Nuevo León
El Sauz	603.0	Pedro Escobedo, Querétaro
Tula	489.0	Tula, Hidalgo
Dos Bocas	452.0	Medellín, Veracruz
Felipe Carrillo Puerto (Valladolid)	220.0	Valladolid, Yucatán
Valle de México	549.0	Acolman, México

Fuente: CFE

Sin embargo estos valores variarían, dependiendo de la composición de los RSU, ya que al implementarse programas de reciclaje, las características de los RSU se ven afectadas.

Del valor neto de generación de energía eléctrica producida, una parte de esta puede ser empleada en la planta de gasificación de los RSU, lo que se refleja en un ahorro muy grande de dinero y de energía.



Tabla 26. Tarifas y relación precio-costo de energía eléctrica por sector de consumo (Pesos/kilowatt-hora).

Concepto	2005"			2006			2007""		
	CFE	LFC	Total^	CFE	LFC	Total^	CFE	LFC	Total^
TOTAL									
Tarifa**	1.00	1.17	1.03	1.10	1.31	1.14	1.14	1.30	1.16
Precio-Costo***	0.70	0.53	0.66	0.75	0.53	0.69	0.76	0.53	0.71
Industria									
Total									
Tarifa**	0.94	1.02	0.96	1.06	1.16	1.08	1.09	1.14	1.10
Precio-Costo***	0.93	0.68	0.87	0.96	0.71	0.91	0.98	0.68	0.91
Mediana Industria									
Tarifa**	1.07	1.06	1.07	1.19	1.20	1.19	1.22	1.17	1.21
Precio-Costo***	0.94	0.67	0.86	0.94	0.71	0.87	0.95	0.67	0.88
Gran Industria									
Tarifa**	0.77	0.87	0.78	0.88	0.99	0.89	0.89	1.01	0.90
Precio-Costo***	0.93	0.71	0.90	1.02	0.75	0.99	1.03	0.73	0.99

* Para el periodo de 2002 a 2007 el cálculo del precio medio y la relación precio-costos, considera los productos excedentes generados con la tarifa que se aplica al Gobierno Federal.

** Se refiere a precio medio en \$/kilowatt-hora.

*** El total no incluye ventas inter-organismos (CFE y LFC).

^Con objeto de presentar con mayor precisión la información del sector eléctrico nacional, se estableció conjuntamente con CFE la tarifa total calculada a partir de promedios ponderados y la relación precio-costos como el cociente de la facturación total y el costo de ambas empresas.

"Cifras definitivas registradas por Comisión Federal de Electricidad.

"" Cifras estimadas al cierre de 2007. No se establecen metas para el año, por lo cual se reportan los valores esperados.

(Fuente: CFE y LFC)

Si consideramos el precio de la energía eléctrica para la industria en nuestro país (Tabla 26), podemos calcular el ahorro económico que se obtiene al autoabastecer la planta de gasificación con la energía producida por la misma (la planta requiere del 7% de la energía generada), el cual se presenta en la Tabla 27.



Tabla 27. Ahorro aproximado por una tonelada, en materia de energía eléctrica, del proceso de gasificación de los RSU

Zona	RSU (ton)	Generación total de energía eléctrica (MWh)	Energía reutilizada en la planta	Energía reutilizada (kWh)	Tarifa de energía eléctrica* (\$/kWh)	Ahorro \$/año
			%			
Norte	1,00	1,40	7,00	98,07	1,09	936407,57
Centro	1,00	1,14	7,00	79,46	1,09	758732,06
DF	1,00	1,26	7,00	88,12	1,09	841366,68
SUR	1,00	1,27	7,00	88,69	1,09	846860,89

*Generación potencial de energía eléctrica, mediante un ciclo combinado (eficiencia de conversión eléctrica de 57%)

**Tarifa de energía eléctrica, reportado por CFE, tipo industrial.

Teniendo en cuenta el ahorro conseguido tratando una tonelada de RSU, como se puede valorar en la tabla anterior, el ahorro que se tendría al tratar 720 ton/día de RSU, podría ser aproximadamente de 600 millones de pesos, lo que hace bastante rentable esta tecnología, ya que el muy poco tiempo se recupera la inversión realizada.

El panorama que se visualiza, con el tratamiento de los RSU mediante el empleo de tecnologías de gasificación presenta grandes beneficios económicos, tanto para la población, como para el país, ya que hay una fuente generadora de empleos, así como una fuente de generación de productos con un alto valor económico, como es el caso de la energía eléctrica.



4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presento la problemática actual en materia de Residuos Sólidos Urbanos que aqueja al país, tocando aspectos sociales, ambientales y económicos. Mediante el análisis de los datos proporcionados por varias instancias públicas del país, así como por estudios e información difundida, por los medios de comunicación se obtuvo un panorama general de la situación que se vive en cada estado de la República, con respecto a los RSU. En este estudio se determino que las zonas en las que se generan una gran cantidad de RSU, son la Norte, la Centro y la que corresponde al DF, por lo que sería una prioridad implementar en estas zonas tecnologías o procesos para la reducción de los RSU.

Se presentaron algunas de las alternativas de tratamiento de los RSU, que se han desarrollado en otras partes del mundo (Digestión anaerobia, Incineración y Gasificación); se analizaron sus procesos, así como las ventajas y desventajas, que estos tratamientos ofrecen. Como resultado de este análisis, se presentó una alternativa técnica de solución a la problemática de los RSU en México. Esta alternativa corresponde a la implementación de una tecnología que se ha difundido en otras partes del mundo, como es el caso de Europa y Asia. La opción propuesta es el tratamiento de los RSU, mediante Gasificación. El tratamiento de los RSU, por este proceso, conlleva varios cambios positivos en su implementación, como es la reducción de RSU, el bienestar social, la minimización de la contaminación así como el cambio de hábitos y toma de conciencia de la población.

La Gasificación es un proceso que presenta varias ventajas distintivas sobre otros métodos de tratamiento de RSU, ya que en este proceso gracias al intervalo de temperaturas que maneja, remueve los materiales volátiles de hidrocarburos



sólidos o líquidos, limita la formación de dioxinas, furanos y grandes cantidades de SOx y NOx, y los convierte a un gas de bajo o medio poder calorífico; además tiene lugar en un ambiente bajo en oxígeno por lo que requiere solo una fracción de la cantidad estequiométrica de éste necesaria para la combustión y como resultado, el volumen del gas de proceso es bajo, requiriendo un equipo de limpieza más pequeño y menos caro. La gasificación genera gas de síntesis (Syngas) que puede ser integrado con turbinas de ciclo combinado, motores reciprocantes y potencialmente a celdas de combustible que producen más del doble de electricidad tan eficientemente como las calderas de vapor convencionales. La transformación de los RSU mediante la Gasificación, en productos comercializables o en energía, reduce la cantidad de materiales enviados a los rellenos sanitarios y al mismo tiempo, previene los grandes problemas de contaminación del aire, suelo y agua ocasionados por los a veces ineficientes o inexistentes programas de tratamiento de los RSU que se han implementado en nuestro país; con la transformación de los RSU en materiales útiles, también es posible disminuir la dependencia del uso de combustibles fósiles para generar energía.

Las ventajas que ofrece el tratamiento de los RSU por gasificación son las siguientes:

Ambientales

- Reducción de los RSU
- Reducción de la contaminación al suelo, agua y aire
- Reducción de los sitios de disposición final (tiraderos a cielo abierto, rellenos sanitarios, etc.)
- Minimización de la erosión del suelo y la deforestación
- Reducción de la emisión de GEI, así como de compuestos tóxicos



Sociales

- Creación de empleos
- Oportunidades de contrato para las personas que actualmente laboran de forma irregular en los sitios de disposición final (pepenadores)
- Cambio de hábitos de la población
- Mejora de la calidad de vida de la población
- Reducción de focos de infección
- Mejora visual de los sitios de disposición final
- Disminución de fauna nociva (ratas, moscas, etc.)

Económicos

- Oportunidad de generación de energía eléctrica
- Obtención de subproductos aprovechables, como el syngas
- Posible transformación de los subproductos en otros con un valor agregado
- Inversión en las energías renovables

La gasificación se presenta como una alternativa prometedora en la reducción de los RSU, trayendo consigo otros beneficios adicionales. Basándose en los beneficios que la tecnología presenta, se puede decir que su implementación en nuestro país es viable, sin embargo para que esta tecnología pueda ser implementada en México, se debe de exponer ante las autoridades competentes, como son: La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Instituto Nacional de Ecología, La Procuraduría Federal del Medio Ambiente, La Secretaría de Energía, así como a las Gobernaturas de cada Estado.



5. REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA

ADLHOCH W., SATO H., WOLFF J. 2000. "High-temperature winkler gasification of municipal solid waste". Gasification Technologies Conference. California, EUA.

ALAMEDA POWER AND TELECOM. 2004. "Investigation into municipal solid waste gasification for power generation". California, EUA.

ARCIGA J. 1999. "Usos energéticos de los residuos sólidos municipales en la Ciudad de México". Tesis Licenciatura. UNAM. México DF.

AVILA K. 1998. "Caracterización y determinación de la generación de residuos sólidos municipales". Tesis Licenciatura. México DF.

BASU P. 2005. "Combustion and gasification in fluidized beds". Taylor & Francis. EUA.

BLANCO P. 2008. "Producción de gas de síntesis por medio de la tecnología de gasificación por arco de plasma térmico a partir de residuos sólidos urbanos". Tesis Licenciatura. México DF.

CAMACHO I. 2003. "Análisis costos-beneficio ambiental de la incineración de residuos sólidos municipales en la Ciudad de México". Tesis Maestría. UNAM. México DF.



-
- CANO P. 2004. "Modelo para la jerarquización y selección óptima de proyectos para el suministro de energía en las zonas no interconectadas de Colombia". Tesis de Maestría. UNAM. México DF.
- CICERI H. 2005. "Decisiones de inversión en plantas químicas, Modelos y criterios". UNAM, México.
- COLLOT A. 2003 "Prospects for hydrogen from coal", IEA Clean Coal Centre, UK.
- CONVERSION TECHNOLOGY REPORT TO THE LEGISLATURE, 2005. "Integrated Waste Management Board". California State. EUA.
- CRUZ R. 1999. "Control ambiental del relleno sanitario de Nuevo Laredo, Tamaulipas". Tesis Licenciatura. UNAM. México DF.
- CHÁVEZ M. 1999. "Solución integral al manejo y disposición final de los residuos sólidos urbanos de Mérida, Yucatán". Tesis Licenciatura. UNAM. México DF.
- CHEREMISINOFF N. 2003. "Handbook of solid waste management and waste minimization technologies". Butterworth-Heinemann. Amsterdam, Holanda.
- DISSUEL E. 1999. "Estrategias y proyección espacial de los residuos sólidos municipales en México". Tesis Maestría. UNAM. México.
- DOLGEN D., SARPTAS H., ALPASLAN N., KUCUKGUL O. 2005. "Energy potencial of municipal solid waste". Taylor & Francis.



ESCOBAR C. 1989. “Las relaciones entre la política energética y el desarrollo industrial: un modelo de simulaciones para planificar la industria petroquímica en México”. UNAM, México.

FAO Forestry Department. 1986. “Wood gas as engine fuel”. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FIGUEIRA J., GRECO S., EHRGOTT M. “Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys” Springer Editors, pag 163-196. Londres, UK. 2005

GALICIA R. 2006. “Regulación ambiental del servicio público de limpia, recolección y disposición final de los residuos sólidos en México”. Tesis Licenciatura. UNAM. México.

GARCÍA A. 2006. “Recomendaciones táctico-operativas para implementar un programa de logística inversa, Estudio de caso en la industria del reciclaje del plástico”. Edición electrónica gratuita. Eumed.net.

GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO, Secretaría de Ecología. 2003. “Estudios básicos sobre la implementación de tarifas para la prevención y gestión integral de residuos sólidos urbanos”. Estado de México. México

GÓMEZ M. 1998. “Los plásticos y el tratamiento de sus residuos”. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.

HERNÁNDEZ J. 2004. “Estudio de generación de residuos sólidos municipales para la construcción del relleno sanitario intermunicipal, Acajete-



Amozoc-Tepatlxco de Hidalgo, en el estado de Puebla”. Tesis Licenciatura. UNAM. México DF.

HIGMAN C., BURGT M. 2003. “Gasification”. Gulf Professional Publish. Elsevier. EUA.

HIRIART G. 2004 “Costo nivelado de la generación en una central de ciclo combinado con gasificador integrado (CCGI)”, en: Memorias de la VII Conferencia Anual de la AMEE, México DF.

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), 2007. “Biomasa: Digestores anaerobios”. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid, ESP.

KEITH C., PORTER J., HUI C. McKAY G. 2004. “Process design and feasibility study for small scale MSW gasification”. Elsevier. Chemical Engineering Journal

KLEIN A. 2002. “Gasification: An alternative process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Waste”. Columbia University. EUA.

KLEINDORFER P., HOWARD K., DAVID H. 1996. “Energy, Environment and the Economy. Asian Perspectives”. Edward Elgar, UK.

KWAK T., MAKEN S., LEE S., PARK J. 2006. “Environmental aspects of gasification of Korean Municipal Solid Waste in a pilot plant”. FUEL. Elsevier.



-
- LARSON E., Worrelle E., Chen J. 1996. "Clean fuels from municipal solid waste for fuel cell buses in metropolitan areas". Resources, Conservation and Recycling. 17 (273-298).
- LEONARD N. 2007. "Industrial waste treatment: contemporary practice and vision for the future". Elsevier. EUA.
- LU Y., GUO L., ZHANG X., YAN Q. 2006. "Thermodynamic modeling and analysis of biomass gasification for hydrogen production in supercritical water". Elsevier.
- MONROY S. 2006. "Los residuos sólidos en el Distrito Federal: Una propuesta de aprovechamiento". Tesis Maestría. UNAM. México.
- MOUNTOURIS A., VOUTSAS E., TASSIOS D. 2005. "Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis". Elsevier.
- NAVARRETE M. 2005. "Disposición final de residuos sólidos municipales". Tesis Licenciatura. UNAM. México DF.
- OCHOA J. 2001. "Simulación numérica del proceso de gasificación para la utilización del carbón o coque de petróleo". Tesis Maestría. UNAM. México, DF.
- ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA (OLADE). 1997. "Manual de gasificación", Organización Latinoamericana de Energía (UNESCO)



ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS). 2003. "Evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales, Informe analítico de México; Evaluación 2002"

ORIGEL M. 2001. "Hacia un manejo integral de los residuos sólidos en la zona urbana del Valle de México". Tesis Maestría. UNAM. México.

ORTINEZ O. 2001. "Procesos de incineración y formación de dioxinas y furanos". Tesis Licenciatura. UNAM. México DF.

OSTREM K., MILLRATH K., THEMELIS N. 2004. "Combining Anaerobic Digestion and Waste-To-Energy". Earth Engineering Center, Columbia University, EUA.

PICHTEL J. 2005. "Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial". Taylor & Francis. EUA.

RESTREPO I., BERNACHE G., RATHJE W. 1991. "Los demonios del consumo (Basura y Contaminación)". Centro de Ecodesarrollo. México.

RATHJE W. 1991. "Rellenos sanitarios: pasado y futuro". National Geographic. EUA.

REIZAIYAN J. "Gasification Technologies: a primer for engineers and scientist". Taylor & Francis. EUA, 2005.

RODRÍGUEZ H. 2000 "Opciones para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero en Colombia". Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Santa Fe de Bogotá, Colombia.



-
- ROGEL A. 2007. "Estudio numérico experimental de un gasificador estratificado que opera con biomasa, utilizando CDF". Tesis Doctorado. UNAM. México DF.
- SALDÍVAR R. 2004. "Análisis técnico para la localización de incineradores en estaciones de transferencia de la Ciudad de México". Tesis de Maestría. UNAM. México DF.
- SÁNCHEZ M. 2001. "Manejo de los residuos sólidos municipales en Zihuatanejo, Guerrero". Tesis Licenciatura. UNAM. México DF.
- SEMARNAP. 1997 (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). "Estadísticas e indicadores de inversión sobre residuos sólidos municipales en los principales centros de México". México DF.
- SEMARNAT. 2001 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). "Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos". México DF.
- SLINGER A. 2003. "TwinRec Gasification and Ash Meeting Technology now also established for municipal waste". EBARA Corporation, Zurich Branc.
- SMOOT L., RADULOVIC T. 1993. "Fundamentals of coal combustion: for clean and efficient use coal science and technologies, vol 20" Elsevier. Amsterdam, Holanda.
- TCHOBANOGLIOUS G. 1994. "Gestión integral de residuos sólidos". McGraw-Hill. Madrid, España.



VALLE K. 2006. "Modelo termodinámico del proceso de gasificación para residuos de refinación". Tesis Maestría. UNAM. México.

VERA O. 2007. "Centrales de ciclo combinado con gasificación integrada (CCEI): Una opción para la diversificación energética". Tesis Licenciatura. UNAM. México DF.

VERMA S. 2002. "Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid waste". Department of earth & environmental engineering. Columbia University, EUA.

WILLIAMS A. 2000. "Combustion and gasification of coal". Taylor & Francis. EUA.



NORMATIVIDAD

NMX-AA-015-1985. “Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Muestreo-Método de cuarteo”. Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 05-10-2007

NMX-AA-016-1984. “Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de humedad”. Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 05-10-2007

NMX-AA-018-1984. “Protección al ambiente-Contaminación de suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de cenizas”. Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 05-10-2007

NMX-AA-019-1985. “Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Peso volumétrico IN SITU”. Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 06-10-2007

NMX-AA-021-1985. “Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de materia orgánica”. Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 06-10-2007

NMX-AA-022-1985. “Protección al ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y cuantificación de subproductos”. Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 06-10-2007

NMX-AA-024-1984. “Protección al ambiente-contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de nitrógeno total”. Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 05-10-2007



NMX-AA-025-1984. "Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos-Determinación del pH-Método potenciométrico". Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 07-10-2007

NMX-AA-033-1985. "Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de poder calorífico superior". Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 07-10-2007

NMX-AA-052-1985. "Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis". Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 07-10-2007

NMX-AA-061-1985. "Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de la generación". Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 06-10-2007

NMX-AA-067-1985. "Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de la relación carbono/nitrógeno". Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 05-10-2007

NMX-AA-068-1986. "Protección al Ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de hidrógeno a partir de materia orgánica". Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 08-10-2007



NMX-AA-092-1984. "Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de azufre". Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 08-10-2007

NOM-083-SEMARNAT-2003. "Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial". Diario Oficial de la Federación. Fecha de consulta: 08-10-2007

PÁGINAS WEB

AMBIENTUM. España. <http://www.ambiental.com>. Fecha de consulta: 25-09-2007

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE. Argentina. <http://www.aidisar.org>. Fecha de consulta: 24-09-2007.

ACCESS TO SUSTAINABLE KNOWLEDGE, España. <http://www.ask-eu.es>. Fecha de consulta: 12-10-2007.

BABCOCK WILCOX VØLUND, Dinamarca. <http://www.volund.dk>. Fecha de consulta: 02-09-2007.

BALBOA PACIFIC CORPORATION. Estados Unidos de América. <http://www.balboa-pacific.com/home.htm>. Fecha de consulta: 10-10-2007.

CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS (CIEMAT). España. <http://www.ciemat.es>. Fecha de consulta: 03-09-2007.



COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE) México. <http://www.cfe.gob.mx>.
Fecha de consulta: 29-02-2008.

EBARA. CORPORATION. Japón. <http://www.ebara.co.jp/en>. Fecha de consulta:
12-11-2007.

ENERKEM TECHNOLOGIES INC. CANADA. <http://www.enerkem.com>. Fecha de
consulta: 12-11-2007.

ENVIO ARC (The PyroArc Process). Noruega. <http://www.enviroarc.com>. Fecha de
consulta: 25-09-2007.

ENVIROMENTAL AGENCY. Reino Unido y Gales. [http://environment-
agency.gov.uk](http://environment-agency.gov.uk). Fecha de consulta: 14-10-2007

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Estados Unidos de América,
<http://www.epa.gov>. Fecha de consulta: 24-09-2007.

EUROPEAN ENVIROMENTAL AGENCY (EEA). Unión Europea.
<http://www.eea.europa.eu/>. Fecha de consulta: 25-03-2008

FOSTER WHEELER. Estados Unidos de América. <http://www.fwc.com>. Fecha de
consulta: 12-10-2007

GLOBAL ENERGY. Estados Unidos de América. <http://www.globalenergyinc.com>.
Fecha de consulta: 11-10-2007



GLOBAL OLIVINE. Nueva Zelanda. <http://www.globalolivine.com>. Fecha de consulta: 11-10-2007

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA (INE). México. <http://www.ine.gob.mx>. Fecha de consulta: 10-09-2007

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRÁFICA E INFORMÁTICA (INEGI). México. <http://www.inegi.gob.mx>. Fecha de consulta: 24-09-2007

INTEGRATED ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES, LLC (IET). Estados Unidos de América. <http://www.inentec.com>. Fecha de consulta: 28-10-2007.

LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS. México. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263.pdf>. Fecha de consulta: 03-10-2007

LURGI GMBH (Lurgi). Alemania. <http://www.lurgi.com>. Fecha de consulta: 13-11-2007.

NOVERA EENERGY. Inglaterra. <http://www.noveraenergy.com>. Fecha de consulta: 27-10-2007.

NYKOMB SYNERGETICS. Suecia. <http://www.nykomb.se>. Fecha de consulta: 27-11-2007.

PHOENIX SOLUTIONS COMPANY & PLASMA ENERGY CORPORATION. Estados Unidos de América. <http://www.phoenixsolutionsco.com/main/index.php>. Fecha de consulta: 12-10-2007.



PLASCO ENERGY GROUP. Canada. <http://www.plascoenergygroup.com>. Fecha de consulta: 22-10-2007

PLASTIVIDA ARGENTINA. Argentina. <http://www.plastivida.com.ar>. Fecha de consulta: 30-12-2007.

PROCESS ENERGY SOLUTIONS. Estados Unidos de América. <http://processenergys.com/education-types.html>. Fecha de consulta: 10-11-2007.

PROCURADURÍA FEDERAL DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE (PROFEPA). México. <http://www.profepa.gob.mx>. Fecha de consulta: 10-09-2007.

PYROGENESIS. Canada. <http://www.pyrogenesis.com>. Fecha de consulta: 21-10-2007.

RECOVERED ENERGY, INC. Estados Unidos de América. <http://www.recoveredenergy.com>. Fecha de consulta: 30-10-2007.

RETECH SYSTEMS, LLC. Advanced Thermal Processing Technologies. Estados Unidos de América. <http://www.retechsystemsllc.com>. Fecha de consulta: 02-12-2007.

SECRETARÍA DE MEDIOAMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT). México. <http://www.semarnat.gob.mx>. Fecha de consulta: 12-10-2007.

SOLENA GROUP. Estados Unidos de América. <http://www.solenagroup.com>. Fecha de consulta: 15-10-2007.

STARTECH. Estados Unidos de América. <http://www.startech.net>. Fecha de consulta: 20-10-2007.



THERMOGENICS, INC (Ti). Estados Unidos de América.
<http://www.thermogenics.com>. Fecha de consulta: 01-11-2007.

THERMOSELECT S.A. Suiza. <http://www.thermoselect.com>. Fecha de consulta:
16-11-2007.

VON ROLL INOVA Suiza. <http://www.vonrollinova.ch>. Fecha de consulta:
02-11-2007.

WASTE TO ENERGY. Inglaterra. <http://www.wastetoenergy.co.uk>. Fecha de
consulta: 26-10-2007.

XERICS – CAB (Canario Africana de Biocombustibles). España.
<http://www.xerics.com>. Fecha de consulta: 23-11-2007.



6. ANEXOS

6.1. MANEJO Y TRATAMIENTO DE LOS RSU EN MÉXICO

En las entidades que presentan una densidad de población elevada en México, se cuenta con un sistema de aseo urbano que en su gran mayoría consta de las siguientes etapas: barrido de vías y áreas públicas, recolección, transporte, tratamiento y disposición final. Sin embargo, el que se cuente con este servicio no corresponde al hecho de que sea eficiente, adecuado o que de una solución a los problemas ocasionados por los RSU.



Figura 25. Ciclo de los RSU
FUENTE: Elaboración propia



La Figura 25 muestra las etapas ideales de las que debe de constar el servicio de limpieza urbana si lo consideramos como un ciclo de proceso, sin embargo, en muchas partes de la República Mexicana, no se realiza de forma completa dicho ciclo.

6.1.1 Almacenamiento

En la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (2005), se define como almacenamiento a “la acción de retener temporalmente los RSU en tanto se procesan para su aprovechamiento o se entregan al servicio de recolección o se disponen”

El almacenamiento es normalmente responsabilidad de los que producen los residuos; el almacenamiento temporal de los RSU en la fuente generadora (mercados, domicilios, escuelas, tiendas de autoservicio, etc.), se da antes de que éstos sean recolectados por el sistema de aseo. Comúnmente los recipientes que se utilizan para el almacenamiento temporal no están diseñados para cumplir con dicha función; por ejemplo en las casas se utilizan bolsas de polietileno, cajas de cartón o cajas de madera que se deterioran con el tiempo y se destruyen. Esta situación trae consigo problemas al tratar de trasladar los residuos a los camiones recolectores.

En la mayoría de los lugares públicos se cuenta con contenedores para la recolección de los RSU, sin embargo, cuando esta acción no es regular, provoca que se generen pequeños tiraderos alrededor de los contenedores, lo que consecuentemente causa malos olores y proliferación de fauna nociva, entre otras cosas.



Actualmente en el país se ha implementado un sistema de separación de RSU, el cual consiste en dividir compuestos de origen “orgánico” de aquellos de origen “inorgánico”. Esta clasificación está muy mal definida desde el punto de vista químico; llamándole “residuo orgánico” a los restos de comida así como a los desechos de jardín como pasto y hojas y “residuo inorgánico” a todo lo que es papel, cartón, vidrio, plástico, metal, y los de control sanitario (gasas, pañales y toallas desechables). La separación de los RSU permite aprovechar al máximo las propiedades inherentes de los materiales, haciendo que su recolección y posterior tratamiento de éstos sean más fáciles, prácticos y efectivos.

6.1.2 Barrido de vías y áreas públicas

Se considera Barrido a la actividad de limpieza de espacios públicos, consistente en la recolección de los RSU depositados en los contenedores y en recoger los que se encuentran tirados en la vía pública y transferirlos a las unidades de recolección para su traslado a los sitios de disposición final o a su tratamiento.

Esta actividad es de vital importancia, ya que limpia las vías de la basura y de los excrementos de los animales, evitando de alguna manera efectos dañinos.

La acumulación de basura en las vías públicas puede ocasionar que se obstruya el drenaje y por lo tanto, se provoquen inundaciones. El barrido puede ser manual o mecánico; el mecánico por lo general se realiza en avenidas principales, mientras que el manual lo realizan las mismas personas de recolección o personal empleado para esta actividad exclusivamente. El costo de barrido varía de 12 a 18 \$/km, y está sujeto a factores tales como el número de personas empleadas y sus condiciones contractuales.



6.1.3 Recolección y transporte

Los sistemas de recolección recorren las áreas donde están las fuentes de generación para recolectar los RSU y llevarlos a sistemas de transferencia, tratamiento o disposición final. Este servicio es proporcionado por lo general por el Gobierno, aunque en algunos lugares también se cuentan con empresas privadas. El INEGI reportó que para el 2005 en México se recolectaban 85,633 toneladas por día de RSU.

En el país se utilizan cuatro tipos de recolección de los residuos sólidos:

- De esquina o parada fija
- De acera
- Intra domiciliario
- Por contenedores

Aparte de estos métodos existe otro proceso que se realiza de forma irregular (contrato colectivo de trabajo), el cual suele ser el más común, en donde un empleado de limpia pasa casa por casa recolectando los RSU en un carrito y cuando la capacidad de éste llega a su límite, el empleado se dirige a una parada específica donde un camión recolector espera (los camiones pueden ser sólo contenedores, compactadores o de tipo roll-off). Dicho proceso se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Recolección por contrato colectivo de trabajo

Una vez recolectados los RSU, son trasladados a los sitios de disposición final o en algunos casos a estaciones de transferencia. Las estaciones de transferencia de RSU, son un conjunto de equipos e instalaciones donde se lleva a cabo el transbordo de los mismos, desde los vehículos recolectores o de los vehículos de carga en gran tonelaje, para después ser transportados hasta los sitios de disposición final, con el fin de reducir los costos y el tiempo de transporte (INE, 1996). En dichas zonas, generalmente la población tiende a aumentar, provocando que existan asentamientos en las periferias de las ciudades, provocando que sea difícil localizar sitios de disposición final cercanos al centro de las poblaciones.

En el 2001 México contaba con estaciones de transferencia en los siguientes lugares: En la ciudad de Guadalajara y Tapatitlán en Jalisco (2); Distrito Federal (13); Tijuana, Baja California, Cd. Juárez en Chihuahua (2); Querétaro, San Luís Potosí, Ciudad del Carmen en Campeche, Tlanepantla en el Estado de México, y en el Área Metropolitana de la Ciudad de Monterrey (3) (SEMARNAT, 2001).



Los costos de recolección estimados en las ciudades medias varían de \$160.00 a \$250.00 M.N. por tonelada, dependiendo principalmente de la densidad de la población, la cantidad de recolecta (eficiencia de llenado), el estado físico de los camiones y el diseño de las rutas de recolección. Los costos de recolección, representan el 95% de los costos totales del servicio cuando éste no incluye los procesos de transferencia o disposición final controlada.

Por otro lado, el costo de la transferencia de los RSU, representa aproximadamente el 29% del monto total del servicio integral (considerando que se opera un relleno sanitario), así como los montos varían en función de la cantidad de RSU manejados y la distancia que se recorre hasta el sitio de disposición final. Los costos reportados, varían desde \$40.00 hasta \$90.00 por tonelada (SEMARNAT, 2001).

6.1.4 Pretratamiento

El manejo de un pretratamiento de los RSU, permite aumentar la eficiencia de los diferentes sistemas de post-tratamiento de los mismos, fomentando la recuperación de materiales reutilizables, así como la posterior conversión de los subproductos en energía.

Existen varios tipos de pretratamientos:

1. Pretratamiento preventivo: El proceso consiste en tratar los RSU con diferentes sustancias para mitigar olores y disminuir la reproducción de moscas o fauna nociva.



2. Pretratamiento para selección y aprovechamiento: El proceso consiste en separar los diferentes subproductos contenidos en los RSU.
3. Pretratamiento para producción de composta: El proceso consiste en someter a la parte orgánica de los RSU a la acción bioquímica de los microorganismos, de manera controlada técnicamente, con el objeto de estabilizar la parte de fácil biodegradación, el cual puede realizarse en condiciones aerobias o anaerobias.
4. Pretratamiento dirigido a la Compactación: El proceso consiste en la reducción del tamaño y volumen de los RSU, lo cual trae como resultado la disminución de espacio que ocupan los mismos, así como facilitar su transportación. Este sistema de compactación puede ser integrado con otros sistemas de tratamiento y eliminación de residuos (recuperación, incineración, etc.), encaminado hacia una estrategia de gestión de residuos integral.

6.1.5 Disposición final

La disposición final de los RSU es la última etapa del ciclo de los RSU. Existen diferentes sitios de disposición final, dentro de los que se encuentran, la deposición en rellenos sanitarios, tiraderos a cielo abierto, tratamientos de incineración, por mencionar algunos.

A continuación se describen los tipos más comunes de la disposición final de los RSU, existentes en nuestro país:

- a) **Vertido a corrientes de agua o al mar:** Consiste en la disposición de los RSU a las corriente de agua como son ríos, lagos o mares; lo cual provoca



el desequilibrio ecológico, contaminando los cuerpos de agua y envenenando a los seres vivos de los ecosistemas, además de producir daños serios a la salud humana cuando llegan a cuerpos de agua de los cuales el ser humano toma el vital líquido o lo utiliza para otros fines (bañarse, lavar, recreación, etc.). Este tipo de prácticas es inaceptable y por lo general se da en zonas rurales o lugares donde no se tiene una adecuada educación en cuanto a la correcta disposición de los RSU.

- b) **Tiraderos a cielo abierto:** Un tiradero a cielo abierto es un lugar en el que se depositan los RSU sin que esté predestinado para esto; no cuenta con las medidas necesarias de control y preparación que se requieren para su adecuada disposición. Este método es de los que más se utiliza en el país y otras poblaciones del mundo, se está tratando de eliminar ya que representa un serio factor de contaminación ambiental. La versión reglamentada de esta práctica son los rellenos sanitarios. En algunos lugares cuando el sistema de recolección no es suficiente para cubrir las necesidades del 100% de la población, la parte que es desatendida tira los RSU en las vías públicas o en lugares que no son destinados para ello, comenzando así un tiradero a cielo abierto.
- c) **Quema al aire libre:** Esta es una de las malas prácticas que se está tratando de erradicar ya que provoca serios daños al ambiente, a la salud de los habitantes y provoca altos índices de contaminación atmosférica. La quema puede ocurrir de manera accidental en tiraderos a cielo abierto donde debido a la producción no controlada de biogás se puede dar una mezcla flamable que puede ser muy susceptible a cualquier chispa provocando un incendio.
- d) **Relleno Sanitario:** Esta técnica de eliminación de los RSU consiste en el depósito, compactación y recubrimiento de los mismos con tierra, en ciclos



diarios. Se hace en lugares controlados sin crear molestias o riesgos a la salud pública y al ambiente. Los terrenos destinados a este tipo de disposición final, deben de cubrir ciertos requerimientos de permeabilidad, y deben ser construidos adecuadamente antes de recibir los RSU, ya que existe el riesgo de contaminación de los mantos freáticos con los lixiviados productos de la degradación de los mismos. Entre otros muchos aspectos la cubierta diaria es lo que distingue a un relleno sanitario de un tiradero a cielo abierto, en este proceso se deposita una cierta cantidad de RSU, para posteriormente ser compactada y finalmente cubierta con una capa de tierra, la cual también es compactada, para poder recibir una nueva capa de RSU. Este método es el más común y cuando se lleva de manera adecuada puede tener buenos resultados. Algunos de los problemas que presenta este tipo de disposición es la limitada capacidad de recepción de los RSU, ya que se ocupan extensiones grandes de terreno y no existe un adecuado tratamiento de los lixiviados generados, así como no existe una apropiada captación de biogás, el cual escapa al ambiente con facilidad.



6.2. Composición de los RSU

Dentro de la composición de los RSU pueden englobarse un sinnúmero de materiales que deben conocerse en profundidad, cuando el propósito es manejar una gestión de los mismos de forma correcta. Generalmente los RSU están compuestos por vidrio, metales, plásticos, papel, restos de comida, textiles, restos de jardinería y otros. Las principales formas en que se presentan cada uno de estos materiales son las siguientes:

- *Vidrio*. Son los envases de cristal, frascos, botellas, etc.
- *Plásticos*. Se encuentran en forma de envases, bolsas, juguetes y elementos de otra naturaleza (como aparatos electrónicos u otros objetos).
- *Textiles*. Ropas y vestidos y elementos decorativos del hogar.
- *Metales*. En forma de muebles mayoritariamente.
- *Restos orgánicos*. Son los restos de comida, de jardinería, etc.
- *Papel y cartón*. Periódicos, revistas, embalajes de cartón, envases de papel, cartón, etc.
- *Otros*. En este grupo se encuentran los residuos finos, los pañales desechables, etc.

La concentración en masa de los diferentes materiales que componen los RSU, puede aumentar o disminuir conforme los hábitos de las comunidades varíen. En la Figura 29, se puede observar cómo ha variado dicha concentración de materiales en los RSU en México a lo largo del tiempo.

Se sabe que la composición de los RSU no es homogénea en la República Mexicana, ya que la composición de ellos depende de la distribución de hábitos de



consumo en la población, así como del poder adquisitivo de la misma. Como se sabe, en nuestro país existen comunidades, en las cuales los recursos económicos son muy escasos, por lo que la gente consume mayormente productos naturales, en contraste con lo que sucede en aquellas comunidades muy urbanizadas, donde se consumen una gran variedad de productos sintéticos. Como resultado, en el sur del país (estados como Oaxaca, Guerrero y Chiapas, por mencionar algunos), existen mayores cantidades de residuos de jardinería o residuos orgánicos, mientras que en las zonas que se encuentran más urbanizadas (como en el Ciudad de México, Monterrey, entre otras), este mismo producto aparece en menor proporción.

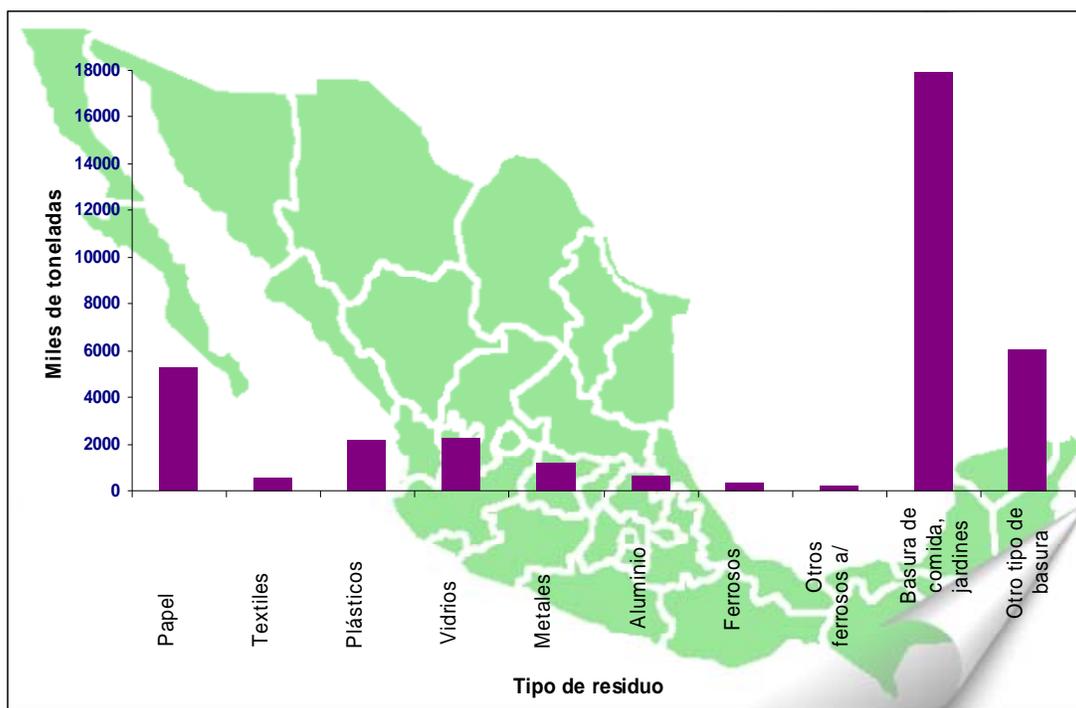


Figura 27. Composición de los RSU en México durante el año 2005.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DATOS INEGI 2005



En la Figura 27, se muestra la generación de RSU, de acuerdo a los distintos materiales que los componen, con datos de estadísticas como ejemplo para el año 2005 en nuestro país.

Tabla 28. Generación de RSU por tipo de basura en México (miles de toneladas)

Tipo de RSU	Año 2005
Papel, cartón, productos de papel	5,276
Textiles	531
Plásticos	2,162
Vidrios	2,261
Metales	1,185
Aluminio	619
Ferrosos	336
Otros ferrosos a/	230
Basura de comida, de jardines y materiales orgánicos similares	17,953
Otro tipo de basura (residuos finos, pañal desechable, etc.)	6,015
Total	35,383

FUENTE: INEGI, 2005

En la,Tabla 28 se presentan algunos datos representativos de la composición de los RSU de acuerdo a las distintas zonas existentes en la República Mexicana:

A continuación se analiza por zonas de la República Mexicana, la composición de los RSU, tomando en consideración, la cantidad de RSU generados en el 2005, por entidad, así como la composición de los RSU reportada por la Organización Panamericana de la Salud (Figura 29).

- **Zona Norte:** AGS, BC, BCS, CHIH, COAH, DGO, NAY, NL, SIN, SLP, SON, TAMPS, ZAC.



- **Zona Centro:** COL, GRO, GTO, HGO, JAL, MÉX, MICH, MOR, PUE, QRO, TLAX, VER.
- **Zona Sur:** CAMP, CHIS, OAX, QR, TAB, YUC.
- **DF:** DF

Tabla 29. Porcentaje de los RSU en las distintas zonas de la República Mexicana.

SUBPRODUCTO	Zona Norte	Zona Centro	DF	Zona Sur
	(%)	(%)	(%)	(%)
Cartón	4,366	1,831	4,844	5,360
Residuos finos	2,225	3,512	8,075	1,210
Hueso	0,644	0,269	0,250	0,080
Hule	0,200	0,087	0,350	0,200
Lata	1,409	1,700	2,966	1,580
Material ferroso	1,476	0,286	0,399	1,390
Material no ferroso	0,652	0,937	1,698	0,060
Papel	10,555	13,684	8,853	14,580
Pañal desechable	8,308	6,008	5,723	3,370
Plástico película	5,120	1,656	1,723	6,240
Plástico rígido	3,152	1,948	1,228	4,330
Residuos de alimentos	21,271	38,538	16,344	34,660
Residuos de jardinería	19,762	7,113	26,975	5,120
Trapo	2,406	0,807	2,157	0,640
Vidrio de color	0,934	4,248	0,599	4,000
Vidrio transparente	5,254	5,051	3,715	6,770
Otros	12,267	12,326	14,102	10,410
TOTAL	100	100	100	100

FUENTE: Organización Panamericana de la Salud, 2002.

De acuerdo a la Figura 28, en las zonas en las que el grado de industrialización es más alto, la generación de residuos orgánicos disminuye, al contrario de la generación de residuos plásticos u otros embalajes. Un ejemplo es la zona que corresponde al DF, en la Figura 28 se aprecia que existe una gran generación de residuos del tipo plástico y por el contrario tiene una muy baja generación de



residuos del tipo orgánico, esto es debido al tipo de vida y a las costumbres de la población en esta zona; ya que se consumen una gran cantidad de enseres con empaque plástico.

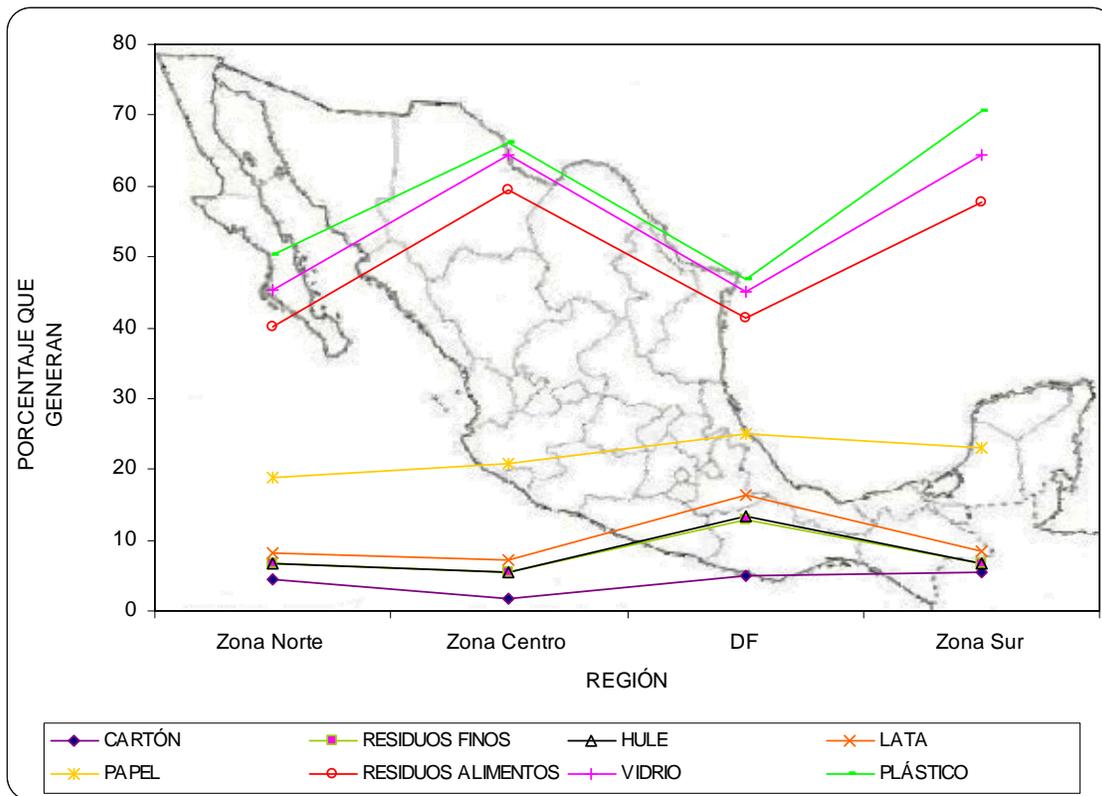


Figura 28. Representación de la generación de subproductos por zona regional.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DATOS INEGI 2005 Y DE EVALUACIÓN REGIONAL E LOS SERVICIOS DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES.

Como resultado del análisis de datos estadísticos en términos de planeación para el manejo de los RSU a corto o largo plazo, es de gran importancia conocer las tendencias futuras en cuanto a su composición. A medida que en una comunidad se adopten leyes que propongan el desarrollo de programas de reciclaje de materiales o se establezca una reducción en la cantidad de ciertos componentes de alto consumo, sin duda la composición de los RSU tendrá un cambio evidente.



La tendencia a través del tiempo que presentan algunos de los componentes principales de los RSU, en México, se aprecia en la Figura 29. En ésta grafica, se puede apreciar que los diferentes componentes de los RSU tienden a aumentar, debido a la creciente población, así como al cambio de hábitos de la misma.

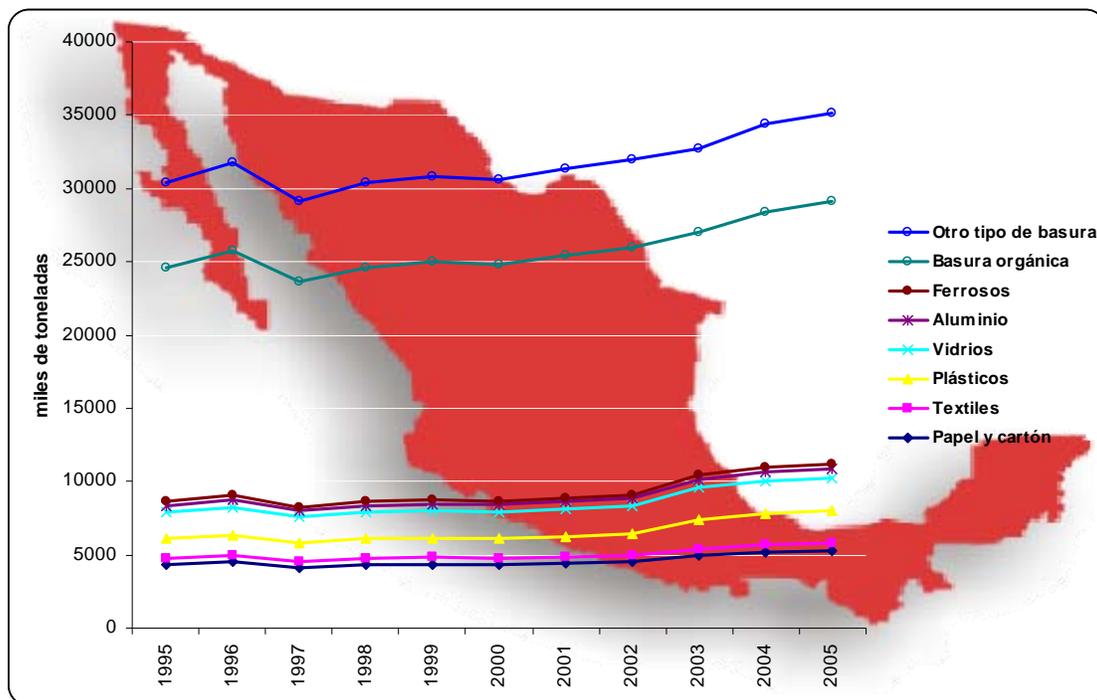


Figura 29. Incremento de los diferentes componentes de los RSU en el periodo de 1995 a 2005.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DATOS INEGI 2005

La caracterización de los RSU en sus componentes elementales, es muy importante para poder tomar la mejor decisión en la proyección y el diseño de los sistemas de manejo, tratamiento y disposición final de éstos. Existe actualmente Normatividad aplicable para cada caso, la cual indica los procedimientos para caracterizar tanto física como químicamente los RSU. En la Tabla 30, se enlista dicha Normatividad asociada.



Tabla 30. Normas relacionadas a la composición y caracterización de los RSU en México

NORMA	TEMA
NMX-AA-15-1985	MÉTODO DEL CUARTEO
NMX-AA-16-1984	DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD
NMX-AA-18-1984	DETERMINACIÓN DE LAS CENIZAS
NMX-AA-19-1985	PESO VOLUMETRICO <i>IN SITU</i>
NMX-AA-21-1985	DETERMINACIÓN MATERIA ORGÁNICA
NMX-AA-22-1985	SELECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE SUBPRODUCTOS
NMX-AA-24-1984	DETERMINACIÓN DEL NITRÓGENO TOTAL
NMX-AA-25-1984	DETERMINACIÓN DEL pH, MÉTODO POTENCIOMÉTRICO
NMX-AA-33-1985	DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO
NMX-AA-52-1985	PREPARACIÓN DE MUESTRAS EN LABORATORIO PARA SU ANÁLISIS
NMX-AA-61-1985	GENERACIÓN <i>PER CAPITA</i> DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
NMX-AA-67-1985	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO
NMX-AA-68-1986	DETERMINACIÓN DE HIDRÓGENO
NMX-AA-92-1984	DETERMINACIÓN DE AZUFRE

FUENTE: SEMARNAT

i) Propiedades Físicas y Químicas de los RSU

Las propiedades físicas y químicas de los RSU conforman las bases técnicas para el diseño y desarrollo de los modernos sistemas integrales y sustentables del manejo de los RSU.



Propiedades físicas

Dentro de las propiedades físicas más importantes de los RSU se encuentran la densidad, contenido de humedad, el tamaño y distribución de partícula y la porosidad del desecho compactado.

1.- Densidad

La densidad se define como la masa de un material por unidad de volumen y se expresa en kg/m^3 . La densidad de los componentes de los RSU varía y está en función del estado en el que se encuentran, ya sea en contenedores, compactados, sin compactar, triturados, etc., (si consideramos el concepto de densidad, ésta es inversamente proporcional al volumen, por lo que si los RSU son compactados reducen su volumen y por lo tanto aumenta su densidad). En este sentido, hay que identificar la forma en que esta propiedad se encuentra expresada para un determinado componente y evitar errores de interpretación.

La densidad es un dato calculado que se requiere continuamente para evaluar la masa y volumen total de RSU a ser manejado. Desafortunadamente, no existe uniformidad en la forma en que se reportan dichos datos en la literatura. Con frecuencia, se suele no hacer distinción entre la densidad de los RSU compactados y sin compactar.

En la Tabla 31 se muestra la densidad típica reportada de los distintos materiales que componen los RSU localizados en contenedores, ya sea compactados o sin compactar.



2.- Humedad

La humedad es la relación entre la cantidad de un material determinado y la cantidad de agua presente en el material. La cantidad de agua que puede retener un residuo, sujeta a la fuerza de la gravedad, es un factor de importancia crítica en la formación de filtraciones en los rellenos sanitarios. El agua en exceso, que no pudo ser retenida por los residuos es liberada en forma de lixiviado. La humedad también varía dependiendo del grado de descomposición que presenten los residuos así como la presión que se les aplica.

La retención de humedad en los RSU no compactados, provenientes principalmente de comercios y del sector domiciliario, se encuentra entre un 50 y un 60%.

El contenido de humedad afecta el contenido energético del mismo (poder calorífico) y es un factor muy importante si se decide usar los RSU como materia combustible de forma directa o como materia prima para la elaboración de combustibles derivados de residuos (CDR).



Tabla 31. Densidad y contenido de humedad de residuos de origen domiciliario, de comercios, industriales y agrícolas.

TIPO DE RESIDUO	Densidad kg/m³		Contenido de humedad % en peso	
	Intervalo	Típico	Intervalo	Típico
Residencial (no compactado)				
Residuo alimenticio	130-140	290	50-80	70
Papel	40-130	90	4-10	6
Corrugado	40-80	50	4-8	5
Plásticos	40-130	65	1-4	2
Textiles	40-100	65	6-15	10
Hules	100-200	130	1-4	2
Piel	100-260	160	8-12	10
Residuos de jardinería	60-225	100	30-80	60
Madera	130-320	240	15-40	20
Vidrio	160-480	330	1-4	2
Lata	50-160	90	2-4	3
Aluminio	65-240	160	2-4	2
Otros metales	130-1150	320	2-4	3
Tierra, cenizas, etc.	320-1000	480	6-12	8
Cenizas	650-830	745	6-12	6
Escombros	90-180	130	5-20	15
Residuos de Jardinería				
Hojarasca (suelta y seca)	30-150	60	0-40	30
Césped (suelto y húmedo)	210-300	240	40-80	60
Césped (mojado y compactado)	600-830	600	50-90	80
Residuos triturados	270-360	300	20-70	50
Residuos abonados	270-390	330	40-60	50
Residuos Municipales				
Compactados en camiones	180-450	300	15-40	20



	Densidad kg/m³		Contenido de humedad % en peso	
En rellenos sanitarios				
■ Compactados normalmente	360-500	450	15-40	25
■ Perfectamente compactados	590-740	600	15-40	25
Residuos de Comercios				
Residuos alimenticios	475-950	540	50-80	70
Enseres	150-200	180	0-2	1
Cajas de madera	110-160	110	10-30	20
Recortes de arbustos	100-180	150	20-80	5
Desperdicio (combustible)	50-180	120	10-30	15
Desperdicio (no combustible)	180-360	300	5-15	10
Desperdicio mixto	140-180	160	10-25	15
Residuos de la Construcción y Demolición				
Varios de demolición (no combustible)	1000-1600	1420	2-10	4
Varios de demolición (combustible)	300-400	360	4-15	8
Varios de construcción (combustible)	180-360	260	4-15	8
Residuos de concreto	1200-1800	1540	0-5	-
Residuos Industriales				
Residuos químicos	800-1100	1000	75-99	80
Cenizas volátil	700-900	800	2-10	4
Recortes de cuero	100-250	160	6-15	10
Metales (pesados)	1500-2000	1780	0-5	-
Metales (ligeros)	500-900	740	0-5	-
Metales (mixtos)	700-1500	900	0-5	-
Aceites, breas, asfaltos	800-1000	950	0-5	-
Aserrín	100-350	290	10-40	20
Textiles	100-219	180	6-15	10



	Densidad kg/m³		Contenido de humedad % en peso	
	Madera (mixta)	400-680	500	30-60
Residuos Agrícolas				
Residuos mixtos	400-750	560	40-80	50
Animales muertos	200-500	360	-	-
Residuos de frutas	250-750	360	60-90	75
Estiércol (húmedo)	900-1050	1000	75-96	94
Residuos de verduras	200-700	360	60-90	75

FUENTE: ARCIGA, 1999

Propiedades químicas

Toda la información referente a la composición química de los RSU, es un factor condicional para poder evaluar procesos de recuperación y tratamiento, así como las opciones de recuperación de energía. Por ejemplo, la calidad en un proceso de combustión de RSU, dependerá de la composición química de las distintas fracciones de éstos.

Si los RSU van a ser usados como combustible (ya sea de manera directa como son recolectados o mediante un proceso de selección de los mismos), existen cuatro pruebas de laboratorio certeras, en donde se obtiene la información suficiente para determinar su contenido energético, éstos son:

- I. Análisis inmediato
- II. Punto de fusión de la ceniza
- III. Análisis final
- IV. Poder calorífico



I. Análisis inmediato

En el análisis inmediato para la fracción combustible (llámese la parte orgánica) de los RSU, se realizan las siguientes pruebas:

- Humedad (pérdida de humedad al calentar a 105°C durante 1 hora).
- Material combustible volátil (pérdida adicional de peso durante la ignición a 950°C dentro de un crisol cerrado).
- Carbono fijo (residuo combustible después de que la materia volátil ha sido removida).
- Ceniza (peso de la materia residual después de la combustión en un crisol abierto).

II.- Punto de fusión de la ceniza

El punto de fusión de la ceniza se define como aquella temperatura a la cual la ceniza resultante de la combustión de los RSU forma un sólido (escoria) por fusión y aglomeración. Las temperaturas de fusión típicas para la formación de escoria a partir de RSU varían de los 1100 a los 1200° C y las escorias obtenidas son utilizadas en algún proceso de tratamiento para reducir emisiones y/o para manejar de modo más controlado los restos últimos de la incineración.

III.- Análisis finales

Los análisis finales de los distintos componentes de los RSU generalmente conducen a la determinación de los porcentajes de Carbono (C), Hidrógeno (H₂), Oxígeno (O₂), Nitrógeno (N₂), Azufre (S) y Cenizas. Además, es posible



determinar la presencia y concentración de residuos tóxicos y peligrosos, por ejemplo la emisión de compuestos con cloro o la determinación de halógenos.

Los resultados permiten conocer a ciencia cierta, la composición química de la materia orgánica presente en los RSU. Estos resultados también son útiles para definir la mezcla de subproductos con el fin de obtener relaciones carbono/nitrógeno apropiadas en procesos de conversión biológica, así como para poder evaluar el riesgo de su manejo, tratamiento o disposición final. En la Tabla 32, se reportan datos típicos de análisis elemental para los RSU.

Tabla 32. Datos típicos sobre el análisis elemental de los componentes combustibles en los RSU domésticos

	<i>Porcentaje en peso (base seca)</i>					
<i>Componentes</i>	<i>Carbono</i>	<i>Hidrógeno</i>	<i>Oxígeno</i>	<i>Nitrógeno</i>	<i>Azufre</i>	<i>Cenizas</i>
Orgánicos						
Residuos de comida	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Papel	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
Cartón	44.0	5.9	44.6	0.3	0.2	5.0
Plásticos	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
Textiles	55.0	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
Goma	78.0	10.0	-	2.0	-	10.0
Cuero	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
Residuos de jardín	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
Madera	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
Inorgánicos						
Vidrio	0.5	0.1	0.4	< 0.1	-	98.9
Metales	4.5	0.6	4.3	< 0.1	-	90.5
Suciedad, cenizas, etc.	26.3	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0

FUENTE: Tchabanoglous, 1994.



Tomando como base 10 kg de RSU, provenientes de una mezcla característica para cada una de las zonas existentes en el país y con base a los datos típicos anteriores, es posible determinar su composición elemental a través de un cálculo grueso, obteniéndose los siguientes resultados (Tabla 33, Tabla 34, Tabla 35 y Tabla 36):

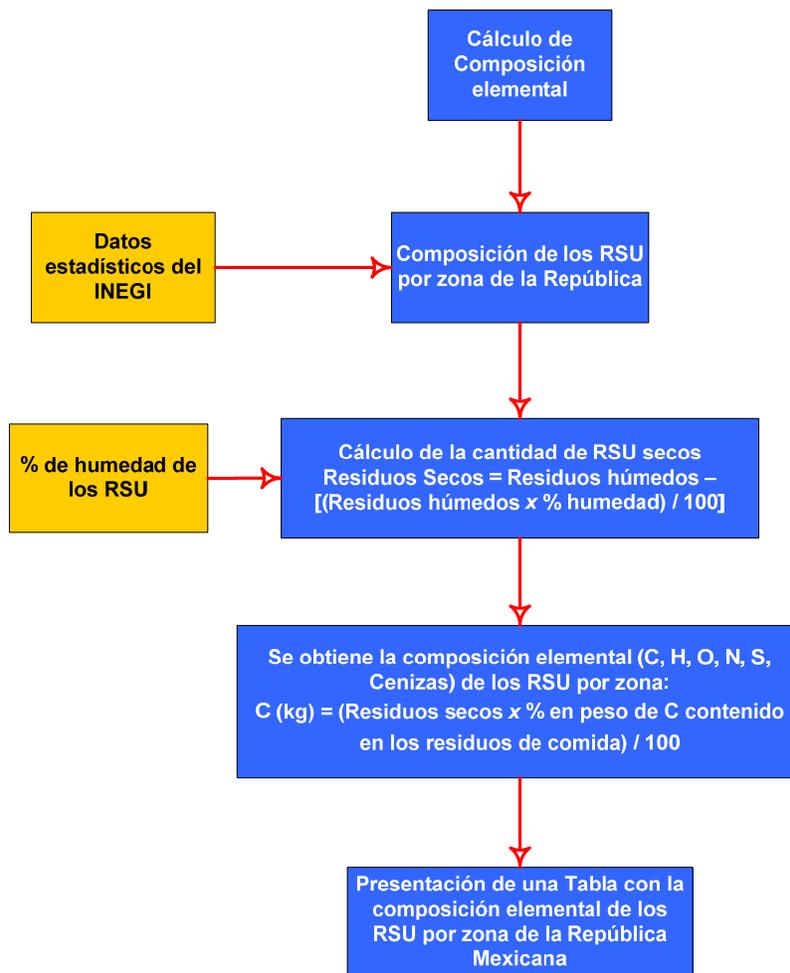


Figura 30. Algoritmo de cálculo para obtener la composición elemental de los RSU

**Tabla 33. Composición elemental de los RSU en la ZONA NORTE**

RESIDUOS	RESIDUOS HUMEDOS	% de Humedad	RESIDUOS SECOS (kg)	C (kg)	H (kg)	O (kg)	N (kg)	S (kg)	Cenizas (kg)
Orgánicos									
Residuos de comida	2,127	70	0,638	0,306	0,041	0,240	0,017	0,003	0,032
Papel	1,056	10,2	0,948	0,412	0,057	0,417	0,003	0,002	0,057
Cartón	0,437	5,2	0,414	0,182	0,024	0,185	0,001	0,001	0,021
Plásticos	0,827	0,2	0,826	0,495	0,059	0,188	-	-	0,083
Textiles	0,241	10	0,217	0,119	0,014	0,068	0,010	0,000	0,005
Goma	0,020	1,2	0,020	0,015	0,002	-	0,000	-	0,002
Cuero	-	10	-	-	-	-	-	-	-
Residuos de jardín	1,976	60	0,790	0,378	0,047	0,300	0,027	0,002	0,036
Madera	-	50	-	-	-	-	-	-	-
Inorgánicos									
Vidrio	0,619	2	0,606	0,003	0,001	0,002	-	-	0,600
Metales	0,354	5	0,336	0,015	0,002	0,014	-	-	0,304
Suciedad, cenizas, etc.	1,449	3,2	1,403	0,369	0,042	0,028	0,007	0,003	0,954
Hueso	0,064	0	0,064	0,027	0,004	0,018	0,002	-	-
Pañales desecha	0,831	3	0,806	0,484	0,058	0,177	0,000	-	-
suma	10,000	SUMA	7,068	2,806	0,352	1,638	0,067	0,011	2,093

Zona Norte: AGS, BC, BCS, CHIH, COAH, DGO, NAY, NL, SIN, SLP, SON, TAMPS, ZAC.

Tabla 34. Composición elemental de los RSU en la ZONA CENTRO

RESIDUOS	RESIDUOS HUMEDOS	% de Humedad	RESIDUOS SECOS (kg)	C (kg)	H (kg)	O (kg)	N (kg)	S (kg)	Cenizas (kg)
Orgánicos									
Residuos de comida	3,854	70	1,156	0,555	0,074	0,435	0,030	0,005	0,058
Papel	1,368	10,2	1,229	0,535	0,074	0,541	0,004	0,002	0,074
Cartón	0,183	5,2	0,174	0,076	0,010	0,077	0,001	0,000	0,009
Plásticos	0,360	0,2	0,360	0,216	0,026	0,082	-	-	0,036
Textiles	0,081	10	0,073	0,040	0,005	0,023	0,003	0,000	0,002
Goma	0,009	1,2	0,009	0,007	0,001	-	0,000	-	0,001
Cuero	-	10	-	-	-	-	-	-	-
Residuos de jardín	0,711	60	0,285	0,136	0,017	0,108	0,010	0,001	0,013
Madera	-	50	-	-	-	-	-	-	-
Inorgánicos									
Vidrio	0,930	2	0,911	0,005	0,001	0,004	-	-	0,901
Metales	0,292	5	0,278	0,012	0,002	0,012	-	-	0,251
Suciedad, cenizas, etc.	1,584	3,2	1,533	0,403	0,046	0,031	0,008	0,003	1,043
Hueso	0,027	0	0,027	0,011	0,002	0,007	0,001	-	-
Pañales desecha	0,601	3	0,583	0,350	0,042	0,128	0,000	-	-
suma	10,000	SUMA	6,616	2,345	0,299	1,447	0,056	0,011	2,387

Zona Centro: COL, GRO, GTO, HGO, JAL, MÉX, MICH, MOR, PUE, QRO, TLAX, VER.



Tabla 35. Composición elemental de los RSU en el DF

RESIDUOS	RESIDUOS HUMEDOS (kg)	% de Humedad	RESIDUOS SECOS (kg)	C (kg)	H (kg)	O (kg)	N (kg)	S (kg)	Cenizas (kg)
Orgánicos									
Residuos de comida	1,634	70	0,490	0,235	0,031	0,184	0,013	0,002	0,025
Papel	0,885	10,2	0,795	0,346	0,048	0,350	0,002	0,002	0,048
Cartón	0,484	5,2	0,459	0,202	0,027	0,205	0,001	0,001	0,023
Plásticos	0,295	0,2	0,295	0,177	0,021	0,067	-	-	0,029
Textiles	0,216	10	0,194	0,107	0,013	0,061	0,009	0,000	0,005
Goma	0,035	1,2	0,035	0,027	0,003	-	0,001	-	0,003
Cuero	-	10	-	-	-	-	-	-	-
Residuos de jardín	2,698	60	1,079	0,516	0,065	0,410	0,037	0,003	0,049
Madera	-	50	-	-	-	-	-	-	-
Inorgánicos									
Vidrio	0,431	2	0,423	0,002	0,000	0,002	-	-	0,418
Metales	0,506	5	0,481	0,022	0,003	0,021	-	-	0,435
Suciedad, cenizas, etc.	2,218	3,2	2,147	0,565	0,064	0,043	0,011	0,004	1,460
Hueso	0,025	0	0,025	0,010	0,001	0,007	0,001	-	-
Pañales desecha	0,572	3	0,555	0,333	0,040	0,122	0,000	-	-
suma	10,000	SUMA	6,977	2,541	0,318	1,471	0,074	0,012	2,495

DF: DF

Tabla 36. Composición elemental de los RSU en la ZONA SUR

RESIDUOS	RESIDUOS HUMEDOS (kg)	% de Humedad	RESIDUOS SECOS (kg)	C (kg)	H (kg)	O (kg)	N (kg)	S (kg)	Cenizas (kg)
Orgánicos									
Residuos de comida	3,466	70	1,040	0,499	0,067	0,391	0,027	0,004	0,052
Papel	1,458	10,2	1,309	0,570	0,079	0,576	0,004	0,003	0,079
Cartón	0,536	5,2	0,508	0,224	0,030	0,227	0,002	0,001	0,025
Plásticos	1,057	0,2	1,055	0,633	0,076	0,241	-	-	0,105
Textiles	0,064	10	0,058	0,032	0,004	0,018	0,003	0,000	0,001
Goma	0,020	1,2	0,020	0,015	0,002	-	0,000	-	0,002
Cuero	-	10	-	-	-	-	-	-	-
Residuos de jardín	0,512	60	0,205	0,098	0,012	0,078	0,007	0,001	0,009
Madera	-	50	-	-	-	-	-	-	-
Inorgánicos									
Vidrio	1,077	2	1,055	0,005	0,001	0,004	-	-	1,044
Metales	0,303	5	0,288	0,013	0,002	0,012	-	-	0,261
Suciedad, cenizas, etc.	1,162	3,2	1,125	0,296	0,034	0,022	0,006	0,002	0,765
Hueso	0,008	0	0,008	0,003	0,000	0,002	0,000	-	-
Pañales desecha	0,337	3	0,327	0,196	0,024	0,072	0,000	-	-
suma	10,000	SUMA	6,997	2,584	0,330	1,643	0,048	0,011	2,343

Zona Sur: CAMP, CHIS, OAX, QR, TAB, YUC.



IV.- Formula mínima de los RSU por zona geográfica

Las estimaciones anteriores permiten determinar una fórmula aproximada para dicha composición elemental, con y sin azufre, en base húmeda y en base seca de los RSU (Tabla 38).

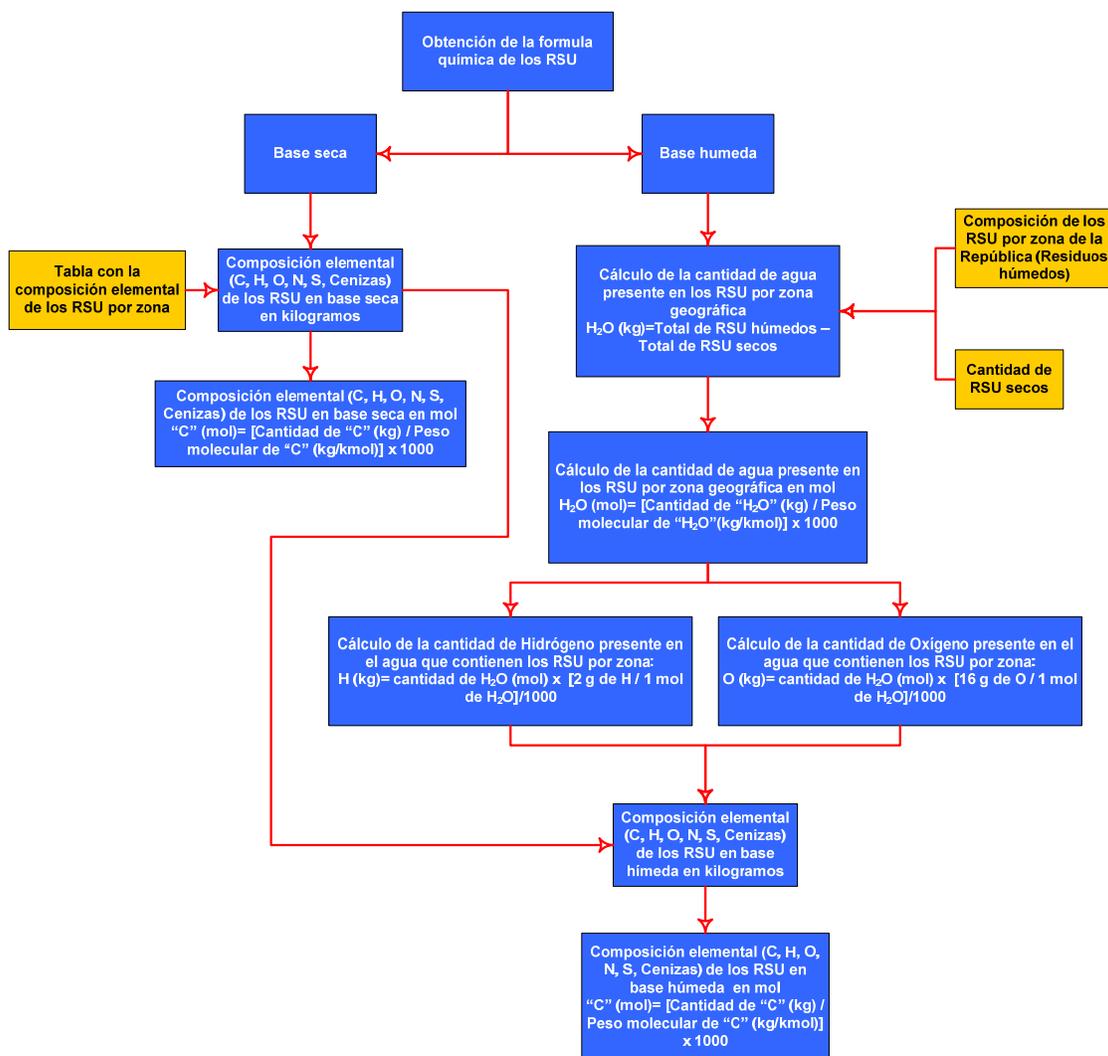


Figura 31. Algoritmo de cálculo para obtener la composición elemental de los RSU por zona geográfica

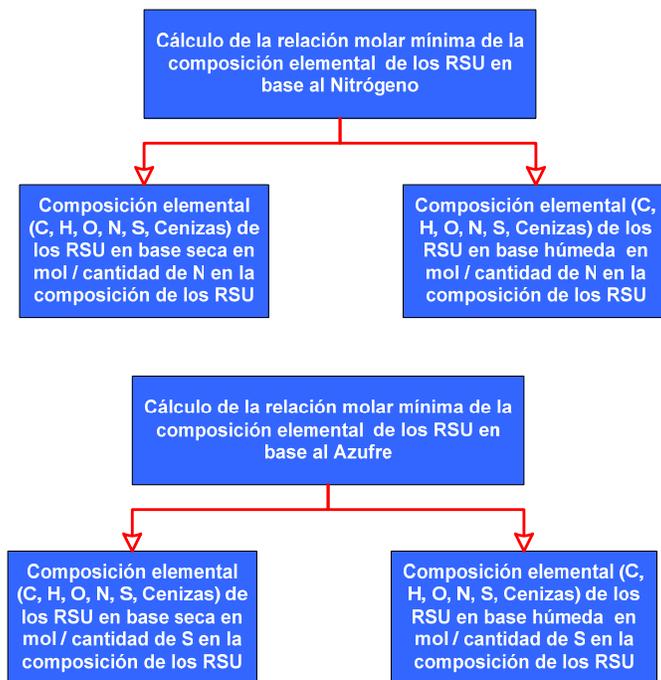


Figura 32. Algoritmo de cálculo de la relación mínima que tiene el N y el S en la composición de los RSU por zona geográfica.

Ejemplo para la zona norte del país:

Tabla 37. Composiciones para el cálculo de la fórmula mínima de los RSU en la ZONA NORTE

	Cantidad en kg		Cantidad en mol		Relación mol (N=1)		Relación mol (S=1)	
	sin H2O	con H2O	sin H2O	con H2O	sin H2O	con H2O	sin H2O	con H2O
C	2,8059	2,8059	0,2338	0,2338	48,9791	48,9791	694,237	694,237
H	0,3517	0,6775	0,3517	0,6775	73,6701	141,9189	1044,210	2011,579
O	1,6378	4,2443	0,1024	0,2653	21,4412	55,5657	303,911	787,596
N	0,0668	0,0668	0,0048	0,0048	1,0000	1,0000	14,174	14,174
S	0,0108	0,0108	0,0003	0,0003	0,0706	0,0706	1,000	1,000

Fuente: Elaboración propia

Para la Zona Norte del país se obtienen las siguientes fórmulas químicas:



■ Sin azufre

- Sin agua $C_{48.98}H_{73.67}O_{21.44}N$
- Con agua $C_{48.99}H_{141.92}O_{55.56}N$

■ Con azufre

- Sin agua $C_{694.24}H_{1044.21}O_{303.91}N_{14.17}S$
- Con agua $C_{694.24}H_{2011.58}O_{787.60}N_{14.17}S$

Tabla 38. Formulas químicas mínimas calculadas para los RSU por zona geográfica

REGIÓN	FORMULA SIN AZUFRE		FORMULA CON AZUFRE	
	Sin agua	Con agua	Sin agua	Con agua
Norte	$C_{48.98}H_{73.67}O_{21.44}N$	$C_{48.99}H_{141.92}O_{55.56}N$	$C_{694.24}H_{1044.21}O_{303.91}N_{14.17}S$	$C_{694.24}H_{2011.58}O_{787.60}N_{14.17}S$
Centro	$C_{48.94}H_{74.78}O_{22.65}N$	$C_{48.94}H_{168.92}O_{69.72}N$	$C_{545.87}H_{834.10}O_{252.66}N_{11.15}S$	$C_{545.87}H_{1884.30}O_{777.75}N_{11.15}S$
DF	$C_{39.91}H_{59.83}O_{17.33}N$	$C_{39.91}H_{123.12}O_{48.97}N$	$C_{551.35}H_{826.61}O_{239.36}N_{13.82}S$	$C_{551.35}H_{1701.01}O_{676.56}N_{13.82}S$
Sur	$C_{62.33}H_{95.43}O_{29.73}N$	$C_{62.33}H_{192.02}O_{78.03}N$	$C_{641.24}H_{981.71}O_{305.87}N_{10.29}S$	$C_{641.24}H_{1975.38}O_{802.70}N_{10.29}S$
Promedio	$C_{48.85}H_{74.02}O_{22.10}N$	$C_{48.85}H_{152.25}O_{61.22}N$	$C_{605.31}H_{917.12}O_{273.88}N_{12.39}S$	$C_{605.31}H_{1886.45}O_{758.54}N_{12.39}S$

Fuente: Elaboración propia

V.- Poder Calorífico

El poder calorífico (PC), es la cantidad de calor necesaria para obtener la combustión completa de un kilogramo de combustible, esta cantidad es esencial en los procesos de recuperación energética, al igual que el porcentaje de cenizas



producidos en los mismos. El PC se determina con una bomba calorimétrica o como resultado de cálculos si se conoce la composición elemental del material combustible. Los valores caloríficos más altos se presentan en donde los residuos son ricos en materiales de empaque como papel, cartón y algunos plásticos.

Las propiedades calorimétricas de los RSU son los parámetros sobre los que se diseñan las instalaciones de incineración y de recuperación energética. Su variabilidad en composición, viene marcada por el contenido energético de cada material. En términos generales, puede indicarse que el valor del poder calorífico de una mezcla de RSU, se encuentra entre 1,500 y 2,200 kcal/kg, aproximadamente². En la Tabla 39, se reporta el contenido energético aproximado para una mezcla típica de RSU.

Tabla 39. Contenido energético aproximado de los RSU.

Componentes	PCI en kcal/kg		Cenizas y otros rechazos en %
	Variación	Típico	
Residuos de comida	600-800	700	8
Madera	4000-5000	4600	2
Papel y cartón	2400-4000	2500	12
Plásticos	6200-7200	6600	3 ¹
Textiles	3000-4000	3400	6 ¹
Vidrio			98
Metales			98

Nota: Valoración sobre base seca

FUENTE: Gestión integral de los Residuos Sólidos

² Enciclopedia Virtual www.ambientum.com



El PC presenta dos variantes: el poder calorífico inferior (PCI) y el poder calorífico superior (PCS). Ambos valores de poder calorífico generalmente se reportan en unidades de kcal/kg o MJ/kg.

El PCI considera que el vapor de agua contenido en los gases de la combustión no condensa. Por lo tanto no hay aporte adicional de calor por condensación del vapor de agua.

El PCS se define suponiendo que todos los elementos de la combustión (combustible y aire) son tomados a 0° C y los productos (gases de combustión) son llevados también a 0° C después de la combustión, por lo que el vapor de agua se encontrará totalmente condensado.

El vapor de agua proviene de la humedad propia del combustible y del agua formada por la combustión del hidrógeno del combustible, al momento de condensar, tiene un aporte de calor de 540 kcal/kg, ya que esta cantidad corresponde al calor latente del agua³.

Para calcular el poder calorífico de los RSU, de las diferentes zonas del país, se realizan las siguientes consideraciones: De la Tabla 29, obtenemos la cantidad de subproductos para una cantidad de 10 kg de RSU.

Los valores calculados de PCI y PCS, es posible obtenerlos mediante las siguientes ecuaciones (estimaciones dependientes de la composición elemental de los RSU).

³ El calor latente es el calor absorbido o liberado por una sustancia al momento de darse un cambio de estado de agregación.



$$PCS \text{ (MJ/kg)} = 34.8 C + 93.8 H + 10.46 S + 6.28 N - 10.8 O^4$$

$$PCI \text{ (MJ/kg)} = 34.8 C + 93.8 H + 10.46 S + 6.28 N - 10.8 O - 2.5 W^5$$

PCS = Poder calorífico superior

PCI = Poder calorífico inferior

C = Carbono en kg (base seca)

N = Nitrógeno en kg (base seca)

S = Azufre en kg (base seca)

H = Hidrógeno en kg (base seca)

O = Oxígeno en kg (base seca)

W = contenido de agua en kg

En la Tabla 44 se presentan los cálculos para valores estimados de poder calorífico superior e inferior para muestras representativas de las distintas zonas de la República Mexicana. Asimismo, en la Figura 33, se representa en forma gráfica dichos valores obtenidos.

⁴ Opciones para la reducción de emisiones de GEI en Colombia 1998-2010.

⁵ IDEM



Tabla 40. Poder Calorífico calculado para los RSU de la ZONA NORTE

RESIDUOS	PCS			
	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)	(kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
Orgánicos				
Residuos de comida	12029,720	8307,295	2873,798	1984,543
Papel	15216,380	14947,227	3635,064	3570,766
Cartón	6650,974	6605,568	1588,861	1578,014
Plásticos	20779,973	20775,837	4964,160	4963,172
Textiles	4821,430	4761,280	1151,799	1137,429
Goma	724,196	723,596	173,004	172,861
Cuero	-	-	-	-
Residuos de jardín	14547,441	11583,141	3475,261	2767,114
Madera	-	-	-	-
Inorgánicos				
Vidrio	136,203	105,263	32,538	25,146
Metales	559,263	515,051	133,603	123,041
Suciedad, cenizas, etc.	16557,158	16441,222	3955,365	3927,669
Hueso	1102,246	1102,246	263,317	263,317
Pañales desecha	20354,494	20292,184	4862,516	4847,631
PROMEDIO	9456,623	8846,659	2259,107	2113,392

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Poder Calorífico calculado par los RSU de la ZONA CENTRO

RESIDUOS	PCS			
	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)	(kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
Orgánicos				
Residuos de comida	21794,996	15050,846	5206,640	3595,520
Papel	19727,233	19378,291	4712,669	4629,310
Cartón	2789,266	2770,223	666,332	661,783
Plásticos	9053,557	9051,755	2162,818	2162,388
Textiles	1617,163	1596,988	386,327	381,507
Goma	315,025	314,764	75,257	75,195
Cuero	-	-	-	-
Residuos de jardín	5236,107	4169,157	1250,862	995,976
Madera	-	-	-	-
Inorgánicos		0,000		
Vidrio	204,678	158,183	48,896	37,789
Metales	462,179	425,641	110,411	101,682
Suciedad, cenizas, etc.	18094,967	17968,263	4322,735	4292,466
Hueso	460,410	460,410	109,988	109,988
Pañales desecha	14719,523	14674,463	3516,370	3505,605
PROMEDIO	7872,925	6616,845	1880,775	1712,434

Fuente: Elaboración propia



Tabla 42. Poder Calorífico calculado para los RSU del DF

RESIDUOS	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
Orgánicos				
Residuos de comida	9243,277	6383,077	2208,141	1524,863
Papel	12762,730	12536,978	3048,908	2994,978
Cartón	7379,138	7328,761	1762,814	1750,779
Plásticos	7413,165	7411,690	1770,942	1770,590
Textiles	4322,454	4268,529	1032,598	1019,715
Goma	1267,343	1266,293	302,758	302,507
Cuero	-	-	-	-
Residuos de jardín	19857,161	15810,911	4743,708	3777,093
Madera	-	-	-	-
Inorgánicos		0,000		
Vidrio	94,955	73,385	22,684	17,531
Metales	800,551	737,264	191,245	176,126
Suciedad, cenizas, etc.	25337,296	25159,880	6052,866	6010,482
Hueso	427,890	427,890	102,219	102,219
Pañales desecha	14021,277	13978,354	3349,564	3339,311
PROMEDIO	8577,270	7337,155	2049,037	1898,850

Fuente: Elaboración propia

Tabla 43. Poder Calorífico calculado para los RSU de la ZONA SUR

RESIDUOS	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
Orgánicos				
Residuos de comida	19601,810	13536,310	4682,707	3233,710
Papel	21018,931	20647,141	5021,245	4932,427
Cartón	8165,190	8109,446	1950,595	1937,278
Plásticos	26552,746	26547,461	6343,227	6341,964
Textiles	1282,508	1266,508	306,380	302,558
Goma	724,196	723,596	173,004	172,861
Cuero	-	-	-	-
Residuos de jardín	3768,996	3000,996	900,381	716,913
Madera	-	-	-	-
Inorgánicos		0,000		
Vidrio	237,056	183,206	56,631	43,766
Metales	479,098	441,223	114,452	105,404
Suciedad, cenizas, etc.	13275,888	13182,928	3171,497	3149,290
Hueso	136,925	136,925	32,710	32,710
Pañales desecha	8256,457	8231,182	1972,398	1966,360
PROMEDIO	8624,984	7385,148	2060,436	1911,270

Fuente: Elaboración propia



Tabla 44. Valores estimados del Poder Calorífico de los RSU para las distintas zonas de México

REGIÓN	PCS		PCI	
	kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg
NORTE	9456.623	2259.107	8846.659	2113.392
CENTRO	7872.925	1880.775	6616.845	1712.434
DF	8577.270	2049.037	7337.155	1898.850
SUR	8624.984	2060.436	7385.148	1911.270

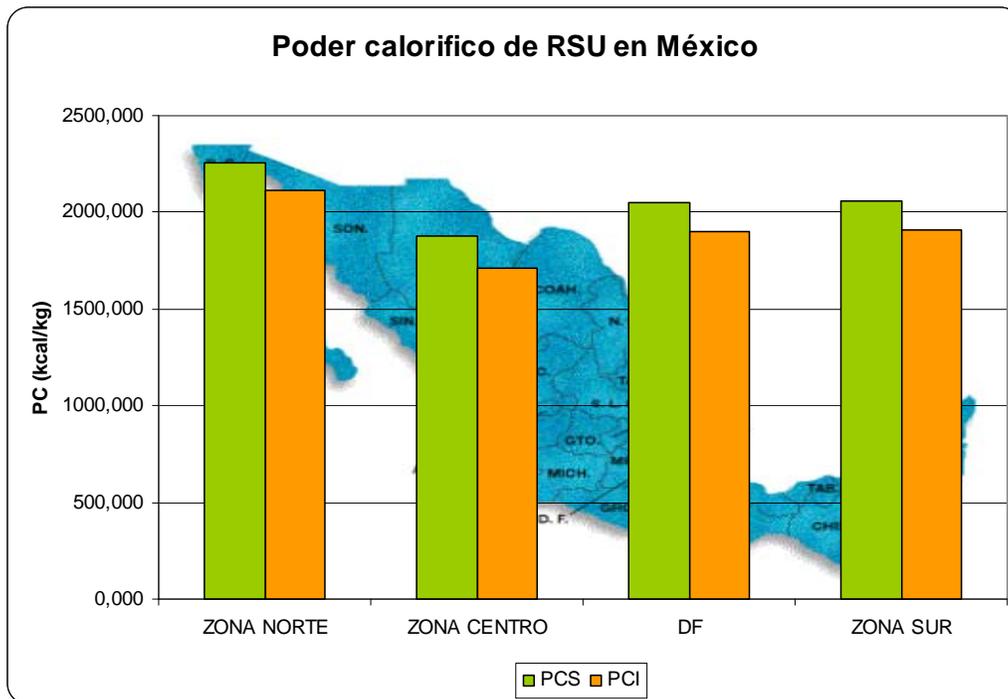


Figura 33. Representación del valor de Poder Calorífico por zona de la República.



En promedio el PC de los RSU en el país tiene los siguientes valores:

Tabla 45. Promedio del Poder Calorífico de los RSU de las distintas zonas

	ZONA NORTE	ZONA CENTRO	DF	ZONA SUR
PCS (kcal/kg)	2259,107	1880,775	2049,037	2060,436
PCI (kcal/kg)	2113,392	1712,434	1898,850	1911,270

Fuente: Elaboración propia



6.3. Métodos de Análisis Multicriterio

Los métodos de análisis multicriterio son una herramienta funcional que proporciona la ayuda para la toma de decisiones donde se toman en cuenta varios criterios que a veces pueden parecer contradictorios. En ocasiones puede suceder que no exista una decisión que sea la mejor para todos los criterios que se están tomando.

Los datos básicos de un problema multicriterio consisten en la evolución de la Tabla 1.

Donde:

a_i = i -ésima alternativa

g_j = evaluación del criterio j

$g_j(a_i)$ = evaluación del criterio j sobre la i -ésima alternativa

Tabla 46. Tabla de evaluación

a	$g_1(.)$	$g_2(.)$	---	$g_j(.)$	---	$g_k(.)$
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	---	$g_j(a_1)$	---	$g_k(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	---	$g_j(a_2)$	---	$g_k(a_2)$
a_3	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	---	$g_j(a_i)$	---	$g_k(a_i)$
a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	---	$g_j(a_n)$	---	$g_k(a_n)$

FUENTE: FIGUEIRA, 2005

Las relaciones de dominancia asociadas con un problema multicriterio son:



$$\begin{cases} g_j(a) \geq g_j(b) \\ g_k(a) > g_k(b) \\ g_j(a) = g_j(b) \end{cases} \Leftrightarrow aPb$$
$$\begin{cases} g_s(a) > g_s(b) \\ g_r(a) < g_r(b) \end{cases} \Leftrightarrow aRb$$

Figura 34. Relaciones de dominancia

FUENTE: FIGUEIRA, 2005

donde P, I, y R indican preferencia, indiferencia e incomparabilidad, respectivamente.

Cuando una alternativa es mejor que otra en un criterio s, y ésta última es mejor que la primera en un criterio r, es imposible decidir cuál es mejor sin información adicional, ambas alternativas son por lo tanto incomparables.

Cuando se tiene la información suficiente se pueden tener:

- Pesos que asignan una importancia relativa de los criterios
- Agregar una función que reúna todos los criterios en una sola variable; de esta forma se tendría un problema mono-criterio y como resultado se obtendría una solución óptima.

Dentro de los métodos multicriterio se pueden construir relaciones de intervalos de superioridad o inferioridad para reducir el número de incomparabilidades; aún así las incomparabilidades no pueden ser eliminadas por completo.

Al construir el método de resolución de un problema multicriterio se debe considerar lo siguiente:



- La amplitud de las desviaciones entre la evaluación de las alternativas dentro de cada criterio debe ser tomada en cuenta:

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$$

- Como la evaluación $g_j(a)$ de cada criterio esta expresada en sus propias unidades, los *efectos de escala* deben ser completamente eliminados. No es aceptable obtener conclusiones dependiendo de la escala en la cual las evaluaciones están expresadas.
- En el caso de comparaciones entre pares de alternativas, en método multicriterio apropiado debe proveer la siguiente información:

a es preferente que b

a y b son indiferentes

a y b son incomparables

Esto tiene como propósito reducir tanto como sea posible el número de incomparabilidades (R), pero solo cuando esto sea realista.

- Diferentes métodos multicriterio necesitan diferente información adicional y operan bajo diferentes procesos de cálculo. Es por lo tanto importante desarrollar métodos que sean entendibles para el tomador de decisiones.
- Un procedimiento adecuado no debe incluir parámetros técnicos que no tengan significado para el tomador de decisiones.



- Un método apropiado debe proveer información sobre la naturaleza contradictoria de los criterios.
- A muchos de los métodos multicriterio les son asignados pesos de relativa importancia del criterio. Usualmente el tomador de decisiones titubea fuertemente al asignar los pesos. Un método apropiado debe ofrecer herramientas de sensibilidad para probar fácilmente conjuntos o series de pesos.

Para el caso de estudio realizado en ésta tesis se utilizo el método PROMETHEE (incluido en el software DECISION LAB), el cual toma en cuenta las consideraciones antes mencionadas. Para aplicar este método se requiere información entre los criterios e información dentro de cada criterio.

La información entre los criterios depende de lo siguiente:

Tabla 47. Pesos de relativa importancia

$g_1(.)$	$g_2(.)$...	$g_j(.)$...	$g_k(.)$
w_1	w_2	...	w_j	...	w_k

FUENTE: FIGUEIRA, 2005

donde w_j representa los pesos de relativa importancia de los diferentes criterios, estos deben ser positivos, e independientes de las unidades de medición de los criterios.

El peso mas elevado, representa el criterio con más importancia. Los pesos deben ser normalizados, es decir



$$\sum_{j=1}^k w_j = 1$$

En el software utilizado los pesos se introducen arbitrariamente sin estar normalizados y el programa los normaliza automáticamente. El peso de los criterios depende de las prioridades y percepciones del tomador de decisiones.

En cuanto a la información dentro de cada criterio, la estructura de preferencias de PROMETHEE esta basada en comparaciones de pares de alternativas evaluadas en los criterios. Se considera la desviación entre las evaluaciones de dos alternativas. Para desviaciones pequeñas, el tomador de decisiones asigna una preferencia pequeña para la mejor alternativa, e incluso puede considerar que no hay preferencia alguna si él considera que la desviación es insignificante.

El método de PROMETHEE considera que las preferencias son números reales que varían entre 0 y 1. Esto significa que para cada criterio el tomador de decisiones tiene en mente una función del tipo:

$$P_j(a,b) = F_j[d_j(a,b)]$$

Donde

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$$

y, para la cual:

$$0 \leq P_j(a,b) \leq 1$$

En el caso de que el criterio deba ser maximizado, ésta función daría la preferencia de a sobre b , debido a las desviaciones observadas entre sus



evaluaciones sobre el criterio $g_j(\cdot)$. Ésta función debe tener la forma que indica la figura.

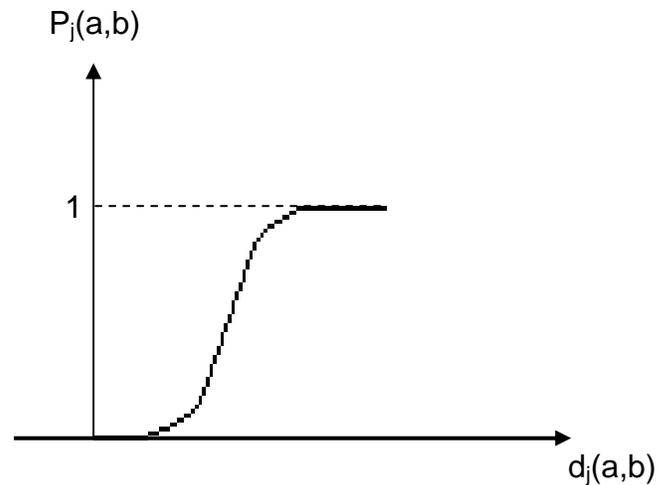


Figura 35. Función de preferencia.
FUENTE: FIGUEIRA, 2005

Las preferencias son iguales a cero cuando las desviaciones son negativas. Cuando los criterios deben ser minimizados, la función de preferencia debe invertirse:

$$P_j(a,b) = F_j[-d_j(a,b)]$$

El par $\{g_j(\cdot), P_j(a,b)\}$ es llamado *criterio generalizado* asociado al criterio $g_j(\cdot)$, para cada criterio debe ser definido el criterio generalizado.

El software utilizado (DECISION LAB) propone seis tipos de funciones de preferencia, las cuales se muestran en la siguiente tabla. En cada caso necesitan ser definidos 0, 1 ó 2 parámetros cuyo significado es claro:

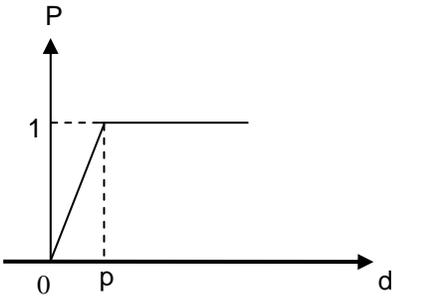
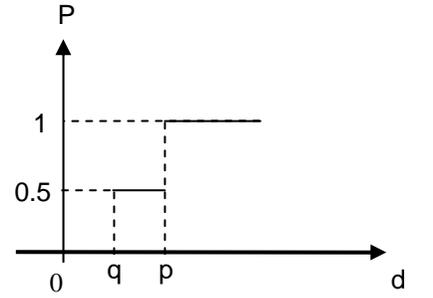
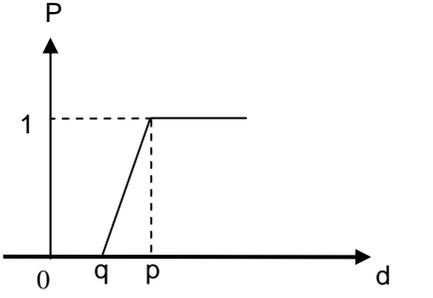
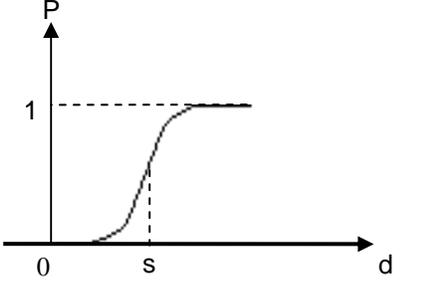


- q es el límite de la indiferencia; es decir, es la desviación más grande que se considera insignificante por el tomador de decisiones.
- p es el límite estricto de la preferencia; es decir, es la desviación más pequeña que se considerada como suficiente para generar una preferencia amplia.
- s es una valor intermedio entre p y q , éste define el punto de inflexión de la función de preferencia. Se recomienda determinar primero q y p , para después obtener s como un valor intermedio entre estos parámetros.

Tabla 48. Funciones de preferencia.

Tipo de función	Forma de función	Definición	Parámetros necesarios
		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	
		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	



Tipo de función	Forma de función	Definición	Parámetros necesarios
		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	
		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	
		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	
		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	



FUENTE: FIGUEIRA, 2005

Tan pronto como la tabla de evaluación (Tabla 1) sea construida, y los pesos w_j y los criterios generalizados $\{g_j(\cdot), P_j(a, b)\}$ estén definidos para $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, k$, el método PROMETHEE puede ser aplicado.

Clasificación I y II de PROMETHEE

Antes de dar la clasificación I y II de PROMETHEE se definirán dos conceptos de suma importancia para estas clasificaciones, índices de preferencia agregados y flujos de categoría superior.

Índices de preferencia agregados.

$$\begin{cases} \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j \\ \pi(b, a) = \sum_{j=1}^k P_j(b, a)w_j \end{cases}$$

$\pi(a, b)$ expresa con que grado a es preferente que b sobre todos los criterios y $\pi(b, a)$ expresa como b es preferente que a. En muchos de los casos hay criterios en los cuales a es mejor que b, y también hay criterios para los cuales b es mejor que a, por consiguiente $\pi(a, b)$ y $\pi(b, a)$ son usualmente positivos.

Cuando $\pi(a, b)$ es prácticamente igual a 0 implica una frágil preferencia global de a sobre b, y cuando $\pi(a, b)$ es prácticamente igual a 1 implica una fuerte preferencia global de a sobre b.



Una vez que $\pi(a,b)$ y $\pi(b,a)$ son calculados para cada par de alternativas de A (A =conjunto de alternativas) puede construirse una gráfica donde se representan los índices de preferencias agregadas de cada criterio.

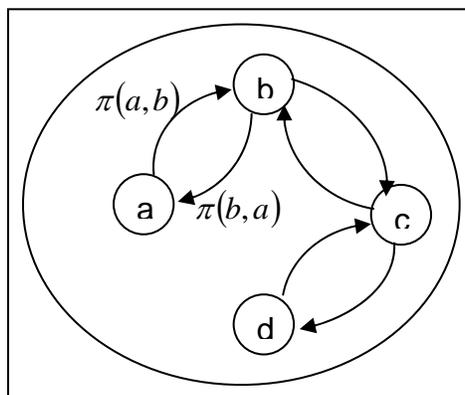


Figura 36. Grafico de índices de preferencias agregadas.
FUENTE: FIGUEIRA, 2005

Flujos de categoría superior

Cada alternativa a es comparada contra $(n-1)$ otras alternativas del conjunto de alternativas A, de donde se definen los dos siguientes flujos de categoría:

- Flujo de categoría positivo

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$$

- Flujo de categoría negativo

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$$



donde x son todas las alternativas diferentes de a .

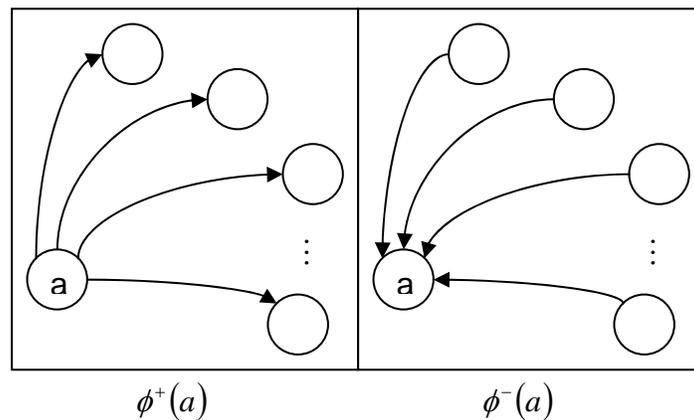


Figura 37. Flujos de categorías de PROMETHEE.
FUENTE: FIGUEIRA, 2005

$\phi^+(a)$ expresa como una alternativa a es de categoría superior que todas las demás alternativas. Éste es su poder, su carácter dominante.

$\phi^-(a)$ expresa como una alternativa a es de categoría inferior que todas las demás alternativas. Ésta es su debilidad, su carácter de inferioridad.

La clasificación parcial. PROMETHEE I

La clasificación parcial PROMETHEE I (P^I, I^I, R^I) es obtenida de los flujos de categorías superior e inferior. Ambos flujos usualmente no inducen hacia la misma clasificación, PROMETHEE I obtiene sus conclusiones en base a las siguientes relaciones:



$$\left\{ \begin{array}{l} aP^I b \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) = \phi^-(b) \end{array} \right. \\ aI^I b \quad \text{si} \quad \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) = \phi^-(b) \\ aR^I b \quad \text{si} \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) > \phi^-(b), \text{ ó} \\ \phi^+(a) < \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) < \phi^-(b) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Figura 38. Relaciones de PROMETHEE I.

FUENTE: FIGUEIRA, 2005

donde (P^I, I^I, R^I) representan, respectivamente, preferencia, indiferencia e incomparabilidad en la clasificación PROMETHEE I.

- Cuando $aP^I b$, un alto poder o dominancia de a es asociado a una baja debilidad de a con respecto a b . La información de ambos flujos de categoría es consistente y puede por lo tanto ser considerada segura.
- Cuando $aI^I b$, ambos flujos, positivo y negativo, son iguales.
- Cuando $aR^I b$ la alternativa a es bueno en algunos criterios donde b es débil, y de manera inversa b es bueno en algunos otros criterios donde a es débil. Para estos casos la información que ambos flujos proveen no es consistente, por lo tanto PROMETHEE I no decide cual alternativa es mejor y el tomador de decisiones es quien se encarga de tomar esta decisión.



La clasificación completa de PROMETHEE II

PROMETHEE II se encarga de hacer una clasificación completa (P^II , I^II). El flujo neto de dominancia puede ser considerado como:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

Éste es el balance entre los flujos de dominancia positivo y negativo

$$\begin{cases} aP^II b & \text{si } \phi(a) > \phi(b) \\ aI^II b & \text{si } \phi(a) = \phi(b) \end{cases}$$

Cuando PROMETHEE II es considerado, todas las alternativas son comparables, pero la información obtenida puede ser más discutible, debido a que mucha información se pierde por considerar el flujo neto de dominancia.

Perfiles de las alternativas

De acuerdo a las definiciones de flujos de categoría positivos y negativos, y a los índices de preferencia agregados, podemos tener:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)] w_j$$

Consecuentemente

$$\phi(a) = \sum_{j=1}^k \phi_j(a) w_j$$

Si



$$\phi_j(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} [P_j(a, x) - P_j(x, a)]$$

$\phi_j(a)$ es el criterio neto obtenido cuando el criterio $g_j(\cdot)$ es considerado (100% del total de los pesos es asignado a ese criterio).

El perfil de una alternativa consiste en el conjunto de todos los criterios netos: $\phi_j(a), j = 1, 2, \dots, k$.

Los perfiles de las alternativas son particularmente útiles para apreciar la “calidad” en los diferentes criterios.

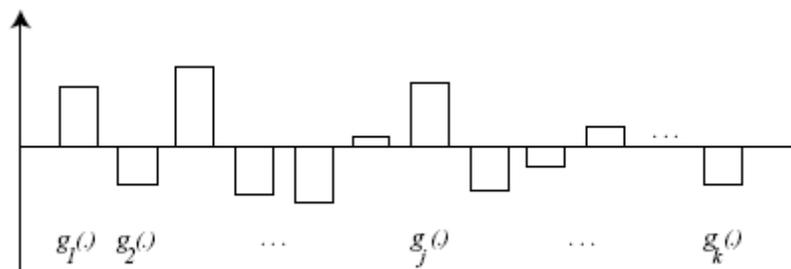


Figura 39. Perfil de una alternativa.
FUENTE: FIGUEIRA, 2005

De acuerdo a $\phi(a) = \sum_{j=1}^k \phi_j(a) w_j$, se observa que el flujo neto de una alternativa es el producto escalar entre el vector de los pesos y el perfil del vector de esta alternativa.



Software DECISION LAB

Para fines del estudio en esta tesis se utilizó el software DECISION LAB el cual implementa el método de análisis multicriterio PROMETHEE.

Este software es una aplicación que utiliza una interfase de hojas desplegadas para manejar los datos de un problema multicriterio.

	Investment	Operations	Employment	Transportation	Environment	Social
Min/Max	Minimize	Minimize	Maximize	Maximize	Minimize	Minimize
Weight	18.0000	10.0000	30.0000	10.0000	10.0000	30.0000
Preference Func3	Linear	Linear	Linear	Level	Level	Level
Indifference Thres	5.00 %	5.00 %	5.00 %	0.5000	0.5000	0.5000
Preference Thres	25.00 %	25.00 %	10.00 %	1.5000	1.5000	1.5000
Caution Thresh	-	-	-	-	-	-
Threshold Int	Percent	Percent	Percent	Absolute	Absolute	Absolute
Unit	M\$	M\$	workers	5-point	Impact	Impact
Site 3	89.8000	7.0000	145.0000	Very Good	Very Bad	Bad
Site 2	86.8000	9.0000	170.0000	Good	Bad	Very Bad
Site 5	128.0000	10.0000	110.0000	Good	Average	Very Good
Site 4	115.0000	8.0000	55.0000	Bad	Good	Very Good
Site 1	74.8000	12.0000	175.0000	Average	Good	Bad

Figura 40. Ventana principal.
FUENTE: FIGUEIRA, 2005

Con este programa es muy fácil definir los datos que requiere el método PROMETHEE, como son las funciones de preferencia, las evaluaciones y los



pesos. La categoría de las alternativas o criterios pueden definirse para identificar mejor los subgrupos y para facilitar el análisis de decisión del problema.

Al finalizar los análisis, el software puede producir un reporte que incluye las tablas y graficas que sean requeridas por el usuario.

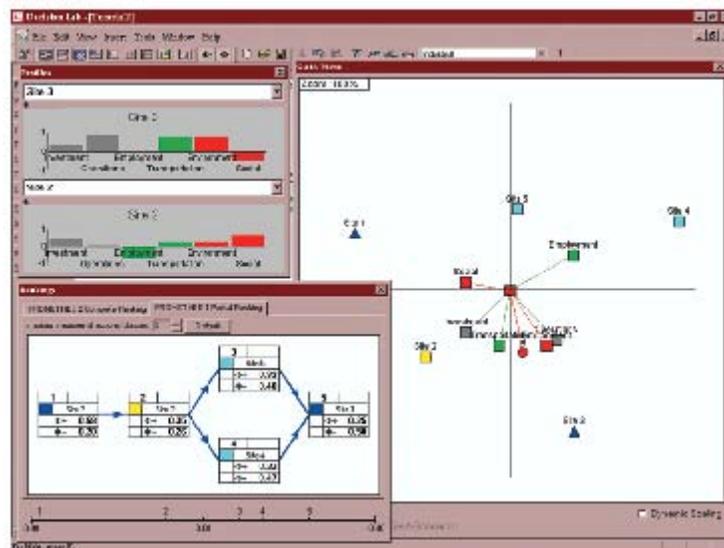


Figura 41. Resultados de análisis de un problema.
FUENTE: FIGUEIRA, 2005



6.4. TIPOS DE GASIFICADORES

i) Gasificador concurrente (downdraft)

Este tipo de gasificador, se desarrolló como una solución al problema de los alquitranes arrastrados en la corriente del gas de síntesis producto de la gasificación. En este tipo, el gas fluye en el mismo sentido descendente que el combustible sólido. Las zonas de pirolisis y secado se encuentran inmediatamente arriba de la zona de oxidación del reactor, por lo que el aire es alimentado por arriba de la zona de oxidación. El calor se transmite hasta la parte superior del gasificador por radiación, convección y conducción, secando parcialmente la materia prima. El vapor de agua liberado es forzado a moverse en el sentido descendente hasta la zona de reducción, en donde participa en las reacciones de gasificación. Al igual que el vapor, los ácidos y otros productos son generados en la pirolisis, son forzados y conducidos hacia abajo, pasando por un lecho de carbón incandescente, en donde los gases son convertidos en gases como H_2 , CO , CO_2 y CH_4 los gases de salida se encuentran en un intervalo de temperatura de $400-650^{\circ}C$. Dependiendo de la temperatura de la zona caliente y del tiempo de residencia de los vapores formados, la formación de alquitranes puede ser disminuida. La Figura 42, muestra un esquema de proceso para el gasificador concurrente.

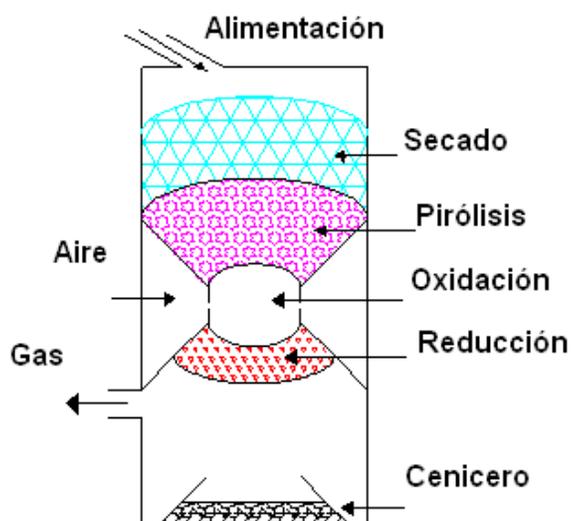


Figura 42. Esquema de un gasificador concurrente

Los gasificadores concurrentes no requieren el uso de vapor de agua combinado con la corriente de aire, cuando el combustible sólido presenta un grado de humedad adecuado. Sin embargo, en estos equipos la humedad de la materia prima de alimentación, afecta el rendimiento térmico del proceso y el poder calorífico del gas de síntesis, por lo tanto, para combustibles con alto contenido de humedad, es necesario un secado previo de los materiales a alimentar. Las temperaturas para las zonas del gasificador son las mismas que las consideradas para el gasificador a contracorriente. El gas de síntesis obtenido, tiene una temperatura de 400 a 500°C, después de un intercambio indirecto de calor con la zona de secado.



En este tipo de gasificador la zona de pirólisis y secado se encuentran arriba de la zona de oxidación del reactor, dándose la transmisión de calor hasta la parte superior del reactor (zona de alimentación) por radiación, convección y conducción

La principal ventaja de este tipo de gasificador, reside en la posibilidad de producir un gas libre de alquitranes, convenientemente para su uso en motores de combustión interna. Debido a los bajos niveles de condensados orgánicos, los gasificadores concurrentes sufren de una mayor aceptación que los gasificadores a contraflujo.

Una de las desventajas, es su aplicación casi nula para diferentes materiales, en particular materiales muy suaves o de baja densidad, ya que ocasionan problemas de exceso de presión en el domo. Otra de las desventajas es que sufre de problemas asociados al alto contenido de cenizas a un grado mayor que las generadas en los gasificadores a contraflujo.

ii) Gasificador a Contracorriente (updrauft)

Este tipo de gasificador es el más viejo y simple; en este sistema el aire entra por la parte inferior del gasificador y sale por la parte superior. En este proceso se distinguen las zonas de secado, de pirólisis (400-650° C), de reducción (650-900°C) y de combustión (900-1200°C). Cerca de la rejilla del fondo ocurren las reacciones de combustión que son continuadas con las reacciones de reducción, las cuales se encuentran en una zona más arriba en el gasificador. En la parte superior del gasificador ocurren el secado y la pirolisis de los materiales alimentados como resultado de la transferencia de calor por convección forzada y



por radiación de las zonas inferiores a las zonas superiores. Dichas zonas, se muestra en la Figura 43.

El control de la temperatura en este proceso requiere la adición de vapor de agua en el flujo de aire o de entrada, ya que la humedad del combustible sólido, una vez siendo evaporada, es arrastrada con los gases generados. La granulometría del combustible sólido debe estar entre 20 y 100 mm, pudiendo llegar a 150 mm como dimensión máxima.

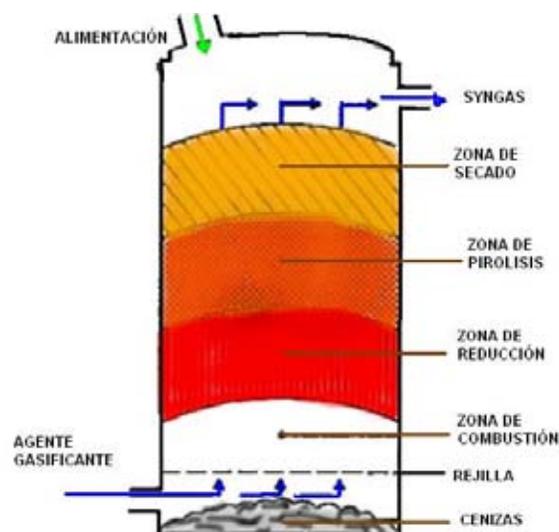


Figura 43. Esquema de un gasificador a contracorriente

Este proceso tiene la ventaja de secar los materiales entrantes que descienden al reactor por el gas que asciende, eliminando la humedad de la carga introducida; sin embargo, se produce vapor de agua, alquitranes y compuestos volátiles, los cuales son arrastrados en la corriente del gas, afectando el rendimiento del equipo en un 20 a 25% y requiere de otros procesos que remuevan estos compuestos del



gas, con fines ambientales. El gas de síntesis generado, se encuentra a temperaturas de 500 a 650° C y las cenizas producidas durante la gasificación, (depositadas en el fondo del gasificador), son removidas más adelante.

La mayor ventaja de este gasificador es su simplicidad y su alto grado de combustión del material, así como el intercambio de calor interno, lo que permite que el gas salga a una temperatura baja; además este proceso tiene la ventaja de que puede ser alimentado con distintos materiales (flexibilidad de tratamiento en la materia prima).

Las mayores desventajas de este proceso resultan de la posibilidad de taponamientos, lo que puede conducir a la concentración de oxígeno en el gasificador, generándose situaciones peligrosas como lo es una explosión. Para prevenir estos problemas operacionales, se pueden instalar rejillas móviles automáticas.

iii) Gasificador de lecho fluidizado

La operación de los gasificadores de flujo directo y contracorriente es influenciada por las propiedades morfológicas, físicas y químicas del combustible. Los problemas que comúnmente se encuentran son: falta de flujo de carbón, producción de escoria y disminución extrema de la presión sobre el gasificador.

Un diseño que se acerca al propósito de disminuir las dificultades mencionadas es el gasificador de lecho fluidizado. Dicho gasificador, ofrece un excelente mezclado entre la alimentación y el agente oxidante, lo que promueve una buena transferencia de masa y calor (cercano a un reactor continuo tipo CSTR). El aire



pasa a través del lecho de partículas sólidas a una velocidad suficiente para mantener estas en un estado de flotación.

La Figura 44 muestra el esquema simplificado de un gasificador de tipo lecho fluidizado. Este gasificador se compone de un reactor vertical dotado de una parrilla en la parte inferior, a través de la cual, se inyecta el oxidante o aire. Al entrar en contacto con la corriente ascendente de aire, las partículas sólidas son suspendidas, formando un lecho fluidizado en el cual se realizan las reacciones termoquímicas de gasificación. Normalmente opera en un intervalo de 800-1100°C (Radulovic et al, 1993); esta temperatura de operación impide la sintetización de la ceniza, facilitando su remoción. Adicionalmente, debido a la temperatura uniforme en el reactor se produce poca formación de alquitrán.

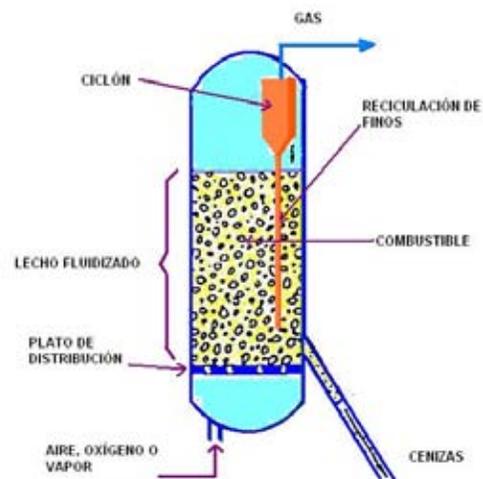


Figura 44. Esquema de un gasificador de lecho fluidizado

El lecho originalmente se calienta externamente y la materia prima es introducida, tan pronto como se alcanza una temperatura suficientemente alta; el combustible



es introducido por la parte inferior del reactor, por lo cual, rápidamente se mezclan con el material del lecho y casi instantáneamente se calientan a la temperatura del lecho. Como resultado de este tratamiento el combustible es pirolizado muy rápidamente, dando como resultado una mezcla con una gran cantidad de gases. Reacciones más allá de la gasificación y la conversión de alquitrán ocurren en la fase gaseosa.

La mayoría de los sistemas están equipados con un ciclón interno para reducir al mínimo la expulsión de carbón tanto como sea posible. Las cenizas se llevan a la parte superior del reactor y tienen que ser removidas de la corriente de gas si se utiliza en motores; sólo una cierta cantidad de carbón parcialmente sin reaccionar es retirado junto con las cenizas, por lo que limita la conversión del mismo. Otras características de este proceso son: opera a temperaturas por debajo de la temperatura de ablandamiento de la ceniza, el tamaño de partícula es crítico (ya que los finos pueden salir sin reaccionar junto con el gas de síntesis) y la eficiencia es de alrededor del 97%. La mayor ventaja de los gasificadores de lecho fluidizado, proviene de la flexibilidad de la materia prima como resultado del fácil control de la temperatura, el cual puede ser mantenido debajo del punto de fundición o fusión de las cenizas; las bajas temperaturas de operación hacen a este proceso apto para carbones altamente reactivos (de bajo rango) y biomasa. Esto también causa la mayor producción de alquitrán (arriba de 500mg/m^3 fase gas) no desintegrado y sustancias volátiles. Problemas con la alimentación, inestabilidad del lecho y aglomeración de cenizas volátiles pueden ocurrir en las vías del gas, cuando se utilizan algunos combustibles biomásicosⁱⁱ.

Dentro de esta categoría de gasificadores puede haber tres distintos regímenes que se diferencian por la velocidad del gas. El agente oxidante cumple con dos



funciones; la de oxidante y medio fluidizante, hecho que tiende a complicar o limitar las condiciones de operación. Las principales características de la gasificación en lechos fluidizados son: alto reciclado de materiales no quemados, operación a una temperatura moderada y uniforme, requerimientos medidos de oxígeno y vapor, y dificultades en el manejo de algunos combustibles.

iv) Gasificador con Arco de Plasma o Antorcha de Plasma

En un reactor con arco de plasma, un arco eléctrico constante es pulsado entre dos electrodos (electrodo de cobre y un baño de escoria fundida u otro electrodo de polaridad opuesta), donde a estos se les inyecta un gas comprimido (normalmente aire) a través de la antorcha. El arco de alta energía crea un gas altamente ionizado con una alta temperatura (entre 5,000°C y 12,000°C), produciendo un plasma. El arco de plasma se encuentra encerrado en una cámara, alcanzando una temperatura del orden de 5,000°C (SOLENA GROUP).

En un gasificador donde se utiliza este tipo de proceso, la materia prima (RSU), es alimentada dentro de la cámara de reacción donde el intenso calor generado por el plasma rompe las moléculas orgánicas (como son aceite, solventes, pinturas, presentes en los RSU) en sus átomos elementales. Los sólidos como vidrio y metales son fundidos para formar materiales, similares a lava endurecida, en los cuales los metales tóxicos son encapsulados (Slag). En este proceso, no existe el quemado o incinerado de materiales, por lo que no existe la formación de cenizas. El gas de síntesis obtenido, contiene un 85-90% de H₂ aprovechando así su contenido energético para la generación de electricidad. En la Figura 45, se muestra un arreglo típico de proceso para la gasificación por arco de plasma, con especial atención en el reactor de plasma.



A bajas temperaturas, los plasmas son una tecnología emergente para disminuir las emisiones de compuestos orgánicos poco volátiles y otros desechos industriales. Los procesos del plasma en desequilibrio han demostrado ser efectivos en el tratamiento de un amplio intervalo de emisiones incluyendo hidrocarburos alifáticos: clorofluorocarbonos, metilcianuros, fosgenos y formaldehído, así como compuestos de sulfuro y organofósforados, óxidos de sulfuro y nitrógeno. Asimismo, se produce un ciclo cerrado, en el que existe una destrucción total de la materia prima, ya que no existen humos contaminantes ni existen efluentes líquidos. Un reactor de plasma puede llegar a tratar desde 20 ton/h de RSU, lo que equivale a 480 ton/día. No hay restricción en el tamaño/dimensión/volumen del tipo de materia prima a procesar en este tipo de gasificadores, por lo que es posible emplearlo a grande escala.

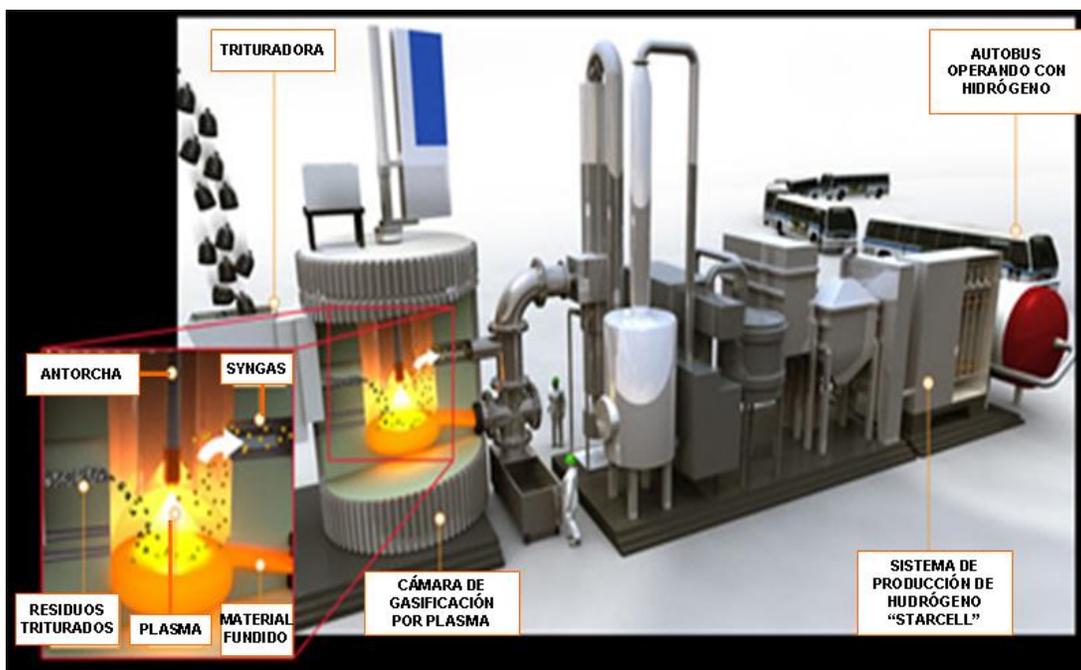


Figura 45. Gasificador de antorchas de plasma

FUENTE: STARTECH



6.4.1 Variables de proceso a considerar para casos de sensibilidad en el proceso de gasificación.

Algunas características a destacar de este proceso son:

- La habilidad para producir un constante producto que puede ser usado para la generación de electricidad o como materia prima para la fabricación de bloques de construcción, fabricantes de productos químicos y combustibles para transporte.
- La habilidad para procesar una amplia gama de materias base incluyendo carbón, aceites pesados, coque de petróleo, residuos pesados de la refinación, residuos de refinación, biomasa, residuos de la agricultura, residuos sólidos urbanos, entre otros.
- La habilidad de remover contaminantes en la materia base y producir un gas de síntesis limpio como producto.
- La habilidad de convertir desechos o productos de bajo valor en productos de alto valor económico.
- La habilidad de reducir al mínimo la cantidad de desechos sólidos que requieren ser dispuestos en un relleno sanitario. Los subproductos sólidos tienen un valor comercial y pueden ser utilizados como combustibles o material de construcción, siendo no peligrosos.

En la Tabla 49, se presenta la composición en % en volumen del gas de síntesis producto, a condiciones normales de proceso para gasificadores comerciales de tiro invertido, de madera y carbón vegetal, que operan con combustibles de contenido de humedad bajo a medio (madera 20%, carbón vegetal 7%) y que emplean como agente gasificante el aire.



Tabla 49. Composición del gas procedente de gasificadores comerciales de madera y carbón vegetal

Componente	Gas de Madera (% volumen)	Gas de Carbón vegetal (% volumen)
Nitrógeno	50 - 54	55 - 65
Monóxido de carbono	17 - 22	28 - 32
Dióxido de carbono	9 - 15	1 - 3
Hidrógeno	12 - 20	4 - 10
Metano	2 - 3	0 - 2
Valor calorífico del gas kJ/m ³	5 000 - 5 900	4 500 - 5 600

FUENTE: Elaboración propia a partir de la referencia 340 de este informe.

En la Tabla 50, se muestra un comparativo de la composición media del gas obtenida cuando se emplean los diversos tipos de agentes gasificantes.

Tabla 50. Composición media del gas para diversos agentes gasificantes

Agente gasificante	PCS (MJ/m ³)	Composición del gas (%)						Uso
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C	
Aire	menor de 6	16	20	12	2	50		Combustible
Oxígeno	10-20	32	48	15	2	3		Gas de síntesis
Vapor de agua	10-21	50	20	22	6		2	Gas de síntesis
Hidrógeno	mayor de 30							Sustituto de gas natural

FUENTE: Elaboración propia a partir de la referencia 324 de este informe.

a) Materia prima a gasificar

La composición porcentual de los materiales que componen a los RSU, determina en gran medida, las condiciones a las que se lleva a cabo la gasificación y por lo tanto, la calidad del gas de síntesis producto. El agente de gasificación (aire, oxígeno o vapor), así como la temperatura y presión de operación del gasificador, afectan ya sea de manera directa o indirecta, la composición química, el valor del



poder calorífico y la aplicación final del gas producido. Aunado a dichos factores tenemos los siguientes:

- Composición de la materia prima de alimentación.
- Preparación y tamaño de partícula de la materia prima de alimentación.
- Intervalo de temperaturas de operación del reactor (gasificador).
- Tiempo de residencia de la materia prima en el reactor.
- Condiciones de alimentación de la materia prima: seco o húmedo.
- Forma de alimentación de la materia prima.
- Sistema de remoción de minerales: cenizas secas o escoria (slag).
- Generación de calor y método de transferencia: directo o indirecto.
- Sistema de limpieza del gas de síntesis: baja o alta temperatura, así como los procesos utilizados para remover sulfuro, nitrógeno, partículas y otros compuestos que pueden afectar el aprovechamiento del gas de síntesis en aplicaciones específicas (por ejemplo, en turbinas y celdas de combustible para generación de energía eléctrica, producción de hidrogeno, producción de combustible líquido o producción de químicos).

b) Temperatura

La temperatura en la zona de reacción de los gasificadores, afecta directamente a las constantes de equilibrio de las reacciones que se llevan a cabo. El emplear altas temperaturas en el proceso de gasificación, incrementa la cantidad de oxígeno necesaria para llevar a cabo dicho proceso, reduciendo de esta forma la eficiencia global del proceso Sin embargo las temperaturas elevadas favorecen las reacciones endotérmicas, dando lugar a la producción de un gas de síntesis de mejor calidad (más rico en CO , H_2 y CH_4). La Figura 46, muestra el



comportamiento de en la producción del gas de síntesis con respecto a la temperatura.

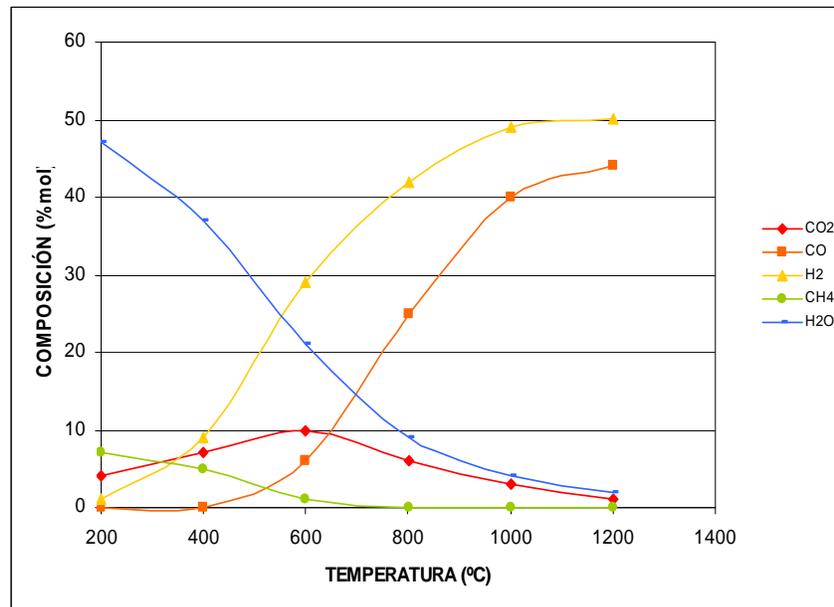


Figura 46. Relación de la Temperatura con la composición del gas de síntesis.
Fuente: Higman y van der Burgt

c) Presión

En general, es posible afirmar que los gasificadores pueden operar tanto a presión atmosférica, como a elevadas presiones, muchas veces depende principalmente a el espacio que se tenga disponible para la instalación del equipo, ya que mientras mayor presión se le aplique al sistema menor será el tamaño del equipo. Sin embargo la presión afecta la composición de los gases de salida (Figura 47), ya que mientras la presión en el gasificador aumenta, la cantidad de CO y de H₂ disminuye y viceversa, la cantidad de CO₂, CH₄ y H₂O se incrementa conforme la



presión aumenta, lo que repercute en la limpieza del gas de síntesis, así como en el poder calorífico del mismo.

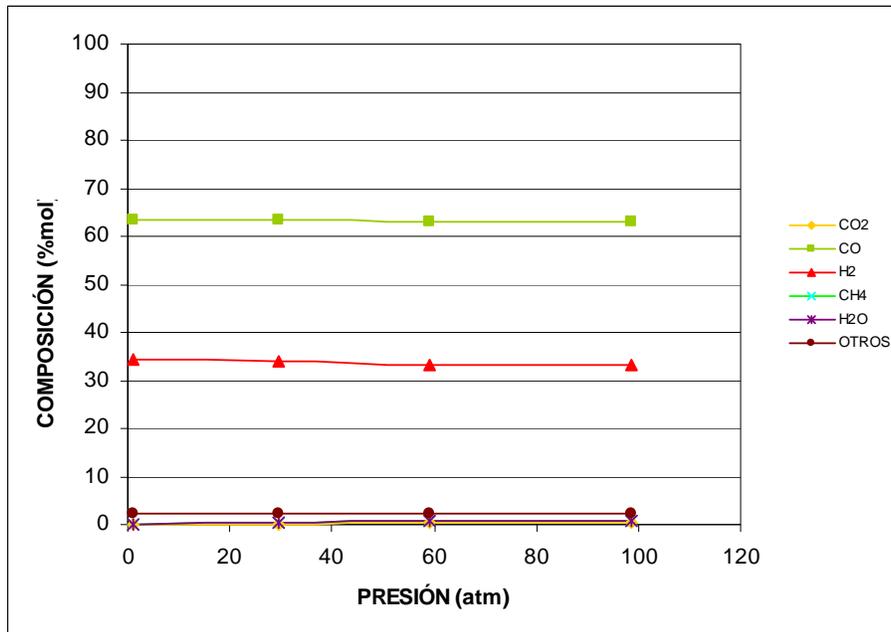


Figura 47. Composición del gas de síntesis para varios valores de presión.
Fuente: Higman y van der Burgt



6.5. TECNOLOGÍAS PARA LA CAPTURA DE CO₂ EN LA LIMPIEZA DE LOS GASES DE SALIDA

Para que el uso de la tecnología de gasificación sea más benéfico y no contribuya a una producción excesiva de CO₂ es posible “secuestrar” este gas por diferentes medios y almacenarlo en diferentes depósitos.

La separación del CO₂ quemado es sencilla, dado que la cantidad de aire necesario para la combustión del gas de síntesis es menor que para quemar gas natural, por lo tanto existe una menor cantidad de nitrógeno en los gases de escape (Vera, 2007).

Secuestro de CO₂ por procesos de absorción

En la industria se utilizan procesos de absorción químicos, físicos o híbridos para capturar el CO₂ y otros gases. Estos sistemas se basan en la absorción/expulsión de los gases seleccionados por medio de los solventes.

Por lo general para estos casos se utilizan columnas de absorción en las que el gas va a contracorriente del solvente; el absorbente ya con CO₂, se envía a un separador donde ya sea que se aumente la temperatura o se disminuya la presión, para así poder liberar el CO₂ y regenerar el absorbente.

Dichos sistemas de purificación continúa actualmente y son utilizados de igual manera en los procesos de gasificación.



La tecnología purificadora con aminas es la tecnología de purificación mas establecida. La preocupación principal del uso esta, es limitar las perdidas de solvente en la corriente de gas, así como la formación de sales termoestables en presencia de impurezas y corrosión, ya ocurre cuando el solvente esta en presencia de O_2 , vapor y altas concentraciones de CO_2 . La principal desventaja de los procesos de absorción química comparados con otras tecnologías de captura de CO_2 , es que el proceso de regeneración del solvente demanda una gran cantidad de energía. Como consecuencia, nuevos tipos de solventes de amina tales como aminas con impedimento estérico y aminas con líquido iónico tienen una mayor selectividad para el CO_2 , una resistencia a la degradación mas grande y bajos requerimientos de energía para regeneración; éstos compuestos se están desarrollando actualmente (Anne-Gaëlle, 2003).

En la industria generalmente se utilizan procesos de absorción física en los cuales el CO_2 puede ser físicamente absorbido por un solvente sin una reacción química. En otros casos, se utilizan los procesos basados en absorbentes sólidos tales como tamices moleculares y el carbón activado, que normalmente son arreglados como camas empacadas de moléculas esféricas.



6.6. EXPRESIONES MATEMATICAS QUE SE UTILIZAN EN LA EVALUACION DE LOS PROYECTOS DE INVERSION

Flujo de Caja Desconectado

$$DCF = C_0 + \frac{C_1}{(1+i)^1} + \frac{C_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+i)^n}$$

Período de Reembolso

$$\sum_{t=1}^n I_t \geq I_0$$

Tasa Interna de Retorno (IRR)

$$0 = \left[\sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+R)^t} \right] C_t - I_0$$

Tasa de Retorno Equivalente (ERR)

$$i = \frac{C}{I} - \frac{i}{(1+i)^n - 1}$$

Tasa de Retorno Modificada (MIRR)

$$\frac{\sum_{t=0}^n [(Y_t - C_t)^n (1+i)^{n-y}]}{\sum_{t=0}^n \left[\frac{C_t^n}{(1+i)^t} \right]} = (1 + MIRR)^n$$

Valor Presente Neto (VPN)

$$VPN = -I_0 + \frac{C_1}{(1+i)^1} + \frac{C_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+i)^n}$$

Valor Neto Futuro (VNF)



$$VPF = \sum_{t=0}^N A_t(1+i)^{n-1}$$

Periodo de recuperación o Payback o Payout (PB)

- 1) Periodo de Recuperación basado en utilidades brutas (Payback time based on gross profit)

$$PB = \frac{\text{Inversión Fija}}{\text{Promedio Anual de las Utilidades Brutas}} = \frac{I}{\sum \frac{UB}{n}}$$

- 2) Período de Recuperación basado en utilidades netas (Payback time base don net profit)

$$PB = \frac{\text{Inversión Fija}}{\text{Promedio Anual de las Utilidades Netas}} = \frac{I}{\sum \frac{UN}{n}}$$

- 3) Período de Recuperación basado en el cash flow (Payback time based on cash flow)

$$PB = \frac{\text{Inversión Fija}}{\text{Promedio Anual del cash flow}} = \frac{I}{\sum \frac{CF}{n}}$$

Retorno sobre la Inversión (ROI)

- 1) Retorno sobre la inversión original

$$ROI = \frac{\text{Utilidades netas}}{\text{Inversión total}} 100 = \frac{P}{I + Iw} 100$$

- 2) Retorno sobre el promedio de la inversión

$$ROI = \frac{\text{Utilidades netas}}{\frac{\text{Inversión inicial}}{2}} 100 = \frac{P}{\frac{I}{2} + Iw} 100$$

Índice de beneficio



$$\text{Indice de beneficio} = \frac{\text{Valor presente neto}}{\text{Inversión inicial}} = \frac{VPN}{I_0}$$

Relación costo/beneficio

$$RCB = \frac{\text{beneficios para el usuario}}{\text{Inversión inicial}} \dots \frac{\text{-efectos negativos para el usuario}}{\text{- costos de operación}} = \frac{B}{C} > 1$$

Retorno sobre la inversión incremental ($ROI_{\text{incremental}}$)

$$ROI_{\text{incremental}} = ROI_{B-A} = \frac{Uneta_B - Uneta_A}{(I + Iw)_B - (I - Iw)_A}$$

Flujo de Caja descontado incremental ($DCF_{\text{incremental}}$)

$$DCF_{\text{incremental}} = -[(I + Iw)_B - (I - Iw)_A] + \frac{Flujo_B - Flujo_A}{(1 - i)^1} + \dots + \frac{(Flujo_B - Flujo_A)_n}{(1 + i)^n}$$

ⁱ La parte orgánica se refiere a todo aquel material que puede ser quemado como el papel, el plástico, los residuos de jardinería, etc., por lo que debe de estar libre de materiales metálicos o material que no pueda ser quemado como cenizas, rocas etc.

ⁱⁱ FAO Forestry Department