

UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**HERRAMIENTA CUANTITATIVA PARA LA
EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON POTENCIAL
ENERGÉTICO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

INGENIERÍA AMBIENTAL - RESIDUOS SÓLIDOS
P R E S E N T A:

ING. ETZEL XHAMÁN HUÍZAR SÁNCHEZ



TUTOR: DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

Cd. Universitaria, 2011

Contenido

ÍNDICE DE TABLAS.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.2.1 <i>Justificación</i>	7
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	7
1.3.1 <i>Objetivos particulares:</i>	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 MARCO REGULATORIO.....	8
2.1.1 <i>Marco regulatorio nacional en materia ambiental</i>	8
2.1.2 <i>Marco regulatorio nacional en materia de salud</i>	15
2.1.3 <i>Marco regulatorio en materia de generación de energía</i>	17
2.1.4 <i>Marco Regulatorio Internacional</i>	18
2.1.5 <i>Comparación de los límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos</i>	20
2.2 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	23
2.2.1 <i>Descripción del tratamiento de Pirólisis</i>	23
2.2.2 <i>Descripción del tratamiento de Incineración</i>	25
2.2.3 <i>Descripción del tratamiento de Gasificación</i>	28
2.2.4 <i>Descripción del tratamiento de Gasificación con arco de plasma</i>	31
3. METODOLOGÍA.....	36
3.1 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	36
3.2 DESARROLLO DE LOS INDICADORES.....	36
3.2.1 <i>Indicadores Ambientales</i>	36
3.2.2 <i>Indicadores Económicos</i>	37
3.2.3 <i>Indicador social</i>	37
3.2.4 <i>Indicadores Técnicos</i>	37
3.3 EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....	37
3.4 DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA.....	37
3.5 CASO DE ESTUDIO.....	38
4. DESARROLLO.....	39
4.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES EN LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	39
4.2 DESARROLLO DE LOS INDICADORES.....	40
4.2.1 <i>Indicadores Ambientales</i>	40
4.2.2 <i>Indicadores Económicos</i>	46
4.2.3 <i>Indicador Social</i>	48
4.2.4 <i>Indicador Técnico</i>	49
4.3 EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....	51

4.3.1 Valores de referencia.....	51
4.4 DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA.....	52
4.4.1 Datos de entrada.....	52
4.4.2 Captura de los nuevos proyectos.....	53
4.5 CASO DE ESTUDIO.....	56
4.5.1 Localidad para el caso de estudio.....	56
4.5.2 Proyecto Thermostelect.....	58
4.5.3 Proyecto Plasco Energy Group.....	60
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
5.1 APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	62
5.1.1 Resultados para la tecnología Thermostelect.....	62
5.1.2 Resultados para la tecnología Plasco Energy Group.....	65
5.1.3 Comparación de los proyectos.....	66
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
6.1 CONCLUSIONES.....	70
6.2 RECOMENDACIONES.....	72
REFERENCIAS.....	74
REFERENCIAS DE PÁGINAS DE INTERNET.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXO A. VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LOS TRATAMIENTOS TERMO-QUÍMICOS.....	82
ANEXO B. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL.....	90
ANEXO C. PODER CALORÍFICO.....	92
ANEXO D. DIAGRAMAS DE PROCESO DE LAS TECNOLOGÍAS PARA EL CASO DE ESTUDIO.....	94
D.1 PLASCO ENERGY GROUP.....	94
D.2 THERMOSELECT.....	95
ANEXO E. MANUAL DE USUARIO.....	96
E.1 PANTALLA PRINCIPAL.....	96
E.2 INGRESO DE DATOS.....	98
E.2.1 Información sobre la localidad.....	98
E.2.2 Captura de un nuevo proyecto.....	99
E.2.3 Modificar los datos de un proyecto existente.....	103
E.3 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN.....	103
E.3.1 Obtención de los resultados de la evaluación.....	103
E.3.2 Comparación de proyectos.....	103
ANEXO F. PROPUESTAS DE PROYECTOS PARA EL CASO DE ESTUDIO.....	108
F1. THERMOSELECT.....	108
F2. PLASCO ENERGY GROUP.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Generación anual per cápita por tipo de localidad, 2009. (Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales , 2010)	2
Tabla 2. Número de instalaciones y capacidad de disposición de residuos sólidos urbanos. (Sistema Nacional De Información Ambiental y de Recursos Naturales, 2010)	2
Tabla 3. Contenido calorífico típico de los residuos sólidos. (Tchobanoglous & Theisen, 1996)	5
Tabla 4. Infraestructura considerada en el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012.	6
Tabla 5. Marco normativo aplicable en materia ambiental (Elaboración propia) (cont.).	9
Tabla 6. Normas técnicas mexicanas en materia de residuos sólidos (Elaboración propia).	12
Tabla 7. Normas oficiales mexicanas en materia de residuos sólidos y contaminación del aire (Elaboración propia).	13
Tabla 8. Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos (Elaboración propia).	14
Tabla 9. Normas Oficiales Mexicanas en materia de salud (Elaboración propia).	15
Tabla 10. Normas Oficiales Mexicanas en materia de salud (Elaboración propia).	16
Tabla 11. Legislación Aplicable a la Generación de Energía Eléctrica (Elaboración propia).	17
Tabla 12. Legislación europea en materia de tratamientos térmicos (Elaboración propia).	18
Tabla 13. Límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera (Directiva 2000/76/CE).	19
Tabla 14. Límites máximos permisibles de emisiones al aire (EPA, 2010).	20
Tabla 15. Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos en e.u., u.e. y México (Elaboración propia).	22
Tabla 16. posibles usos de los productos de la gasificación. (Thermoselect, 2009)	30
Tabla 17. Residuos de la gasificación. (Thermoselect, 2009)	30
Tabla 18. Variables ambientales (Elaboración propia).	39
Tabla 19. Variables económicas (Elaboración propia).	39
Tabla 20. Variables Sociales (Elaboración propia).	39
Tabla 21. Variables técnicas (Elaboración propia).	40
Tabla 22. Factores de emisión y consumo de combustibles para la generación de energía. (Adaptada de IPCC, 1997 y CFE, 2009)	43
Tabla 23. Consumo de combustible para la generación de energía eléctrica en la República Mexicana (CFE, 2009).	44
Tabla 24. Clasificación de sitios de disposición final y factores de corrección de metano. (IPCC, 1996)	45

Tabla 25. Valores comunes para los principales tipo de residuos sólidos orgánicos. (Bingemer, Crutzen, 1987)	45
Tabla 26. Contenido energético típico de los residuos sólidos. (Tchobanoglous & Theisen, 1996)	50
Tabla 27. Descripción y unidades de los indicadores desarrollados (Elaboración propia).	51
Tabla 28. Valores de referencia para cada uno de los indicadores (Elaboración propia).	52
Tabla 29. Información sobre la localidad requerida por la herramienta (Elaboración propia).	53
Tabla 30. Información sobre la tecnología requerida por la herramienta (Elaboración propia).	53
Tabla 31. Información necesaria sobre la localidad (Elaboración propia).	56
Tabla 32. Parámetros fisicoquímicos de los residuos dispuestos en la Ciudad de México. Secretaría de Obras y Servicios. Dirección Técnica. 2008).	57
Tabla 33. Composición física de los RSU de la Ciudad de México (Secretaría de Obras y Servicios. Dirección Técnica. 2008).	57
Tabla 34. Datos técnicos, económicos, sociales y ambientales de Thermoselect (Thermoselect, 2009).	60
Tabla 35. Datos técnicos, económicos, sociales y ambientales de Plasco Energy Group (Plasco Energy Group, 2010).	61
Tabla 36. Empleos creados durante la operación de Thermoselect (Elaboración propia).	63
Tabla 37. Empleos creados durante la operación de Plasco Energy Group (Elaboración propia).	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición de los residuos sólidos urbanos generados en la República Mexicana. (Sistema Nacional De Información Ambiental y de Recursos Naturales, 2010)	3
Figura 2. Diagrama del proceso de incineración (Plan Nacional de Manejo de Desechos.Gobierno de Costa Rica).	25
Figura 3. Diagrama de proceso de gasificación. (Hofbauer, Fleck, Rauch, Mackinger, & Fercher, 1997)	29
Figura 4. Diagrama del proceso de gasificación con plasma. (Westinghouse Plasma Corporation (WPC))	31
Figura 5. Captura de un nuevo proyecto y estrategias políticas.	54
Figura 6. Captura de datos del proyecto.	55
Figura 7. Resultados de la planta thermoselect.	64
Figura 8. Resultados de la planta plasco energy group.	67
Figura 9. Comparación de los resultados de los proyectos seleccionados y los valores de referencia.	69
Figura 10. Pantalla principal de la herramienta.	97
Figura 11. Ventana de captura de la información de la localidad.	98
Figura 12. Captura de datos para un nuevo proyecto.	99
Figura 13. Ventana de captura de la información relativa al proyecto.	101
Figura 14. Resultados de la búsqueda de proyectos.	102
Figura 15. Ventana de comparación de proyectos.	104
Figura 16. Ventana de resultados.	105
Figura 17. Ventana de resultados con valores de referencia.	106
Figura 18. Resultados de la comparación de proyectos.	107

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes.

De acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos un residuo se define como: "... 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 conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven;" (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2007)

De acuerdo a esta definición un residuo es aquel al que ya no se le encuentra utilidad y se desecha, pero que puede ser reutilizado, reciclado o tratado para convertirlo en materia prima de otros procesos o dispuesto en un lugar acondicionado para tal fin.

La gestión integral de los residuos sólidos es el conjunto de procedimientos y políticas que conforman el sistema de manejo de los residuos sólidos. La meta es realizar una gestión que sea ambiental y económicamente adecuada. La correcta gestión comprende siete etapas: Generación, Almacenamiento, Recolección, Transporte, Reúso y Reciclaje, Tratamiento y Disposición Final.

De acuerdo a lo dispuesto en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, los municipios están obligados a realizar la gestión y el manejo integral de los residuos sólidos urbanos, que consiste en la recolección, traslado, tratamiento y su disposición final. Para ello, los municipios tienen la facultad de otorgar las autorizaciones y concesiones de las actividades del manejo integral de los residuos sólidos urbanos.

La adopción de una o más alternativas para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos deberá tener un fuerte respaldo técnico, económico, social y ambiental que justifique la decisión, ya que en muchos casos, involucra una inversión y costo de operación elevado, o bien, un impacto ambiental o social negativo.

El desempeño deficiente de los gobiernos locales en el manejo de los residuos sólidos urbanos puede ocasionar graves problemas de salud pública (daños en el sistema respiratorio, enfermedades infectocontagiosas, de la piel, alergias, entre otras) y de imagen urbana (residuos en calles, avenidas, márgenes de ríos, terrenos baldíos, etc.). Es por ello de gran importancia la correcta gestión de los residuos sólidos, así como la adecuada toma de decisiones sobre las medidas a tomar para solucionar u optimizar el manejo de los residuos sólidos urbanos.

La generación de residuos municipales está directamente relacionada con el nivel socioeconómico de la población generadora de los residuos sólidos, pues está en función de factores socio-culturales asociados a los niveles de ingreso, hábitos de consumo, desarrollo tecnológico y estándares de calidad de vida de la población. Los sectores de más altos ingresos

generan mayores volúmenes per cápita de los residuos, y estos residuos tienen un mayor valor incorporado que los provenientes de sectores más pobres de la población (Gobierno de Chile, 2001).

Igualmente, existe una gran relación entre el tamaño de la localidad y la cantidad de residuos que genera dicha población, siendo las grandes ciudades las mayores generadoras de residuos sólidos. En la Tabla 1 se observa la generación de residuos durante el año 2009 por tipo de localidad.

Tipo de localidad	Generación (miles de ton)
Zonas metropolitanas	18,030
Ciudades medias	13,231
Localidades urbanas pequeñas	2,503
Localidades semirurales y rurales	4,561
Total	38,325

TABLA 1. GENERACIÓN ANUAL PER CÁPITA POR TIPO DE LOCALIDAD, 2009. (SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES, 2010)

De acuerdo a Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN), en el año 2009, en el país se contaba con un total de 137 rellenos sanitarios y 24 sitios controlados, con una capacidad de 22'175,100 y 3'924,900 toneladas respectivamente, como lo muestra la Tabla 2. Si estos datos son comparados con los datos de generación de residuos sólidos, se observa que en el país solamente se reciclan aproximadamente 1'500,000 toneladas anualmente, lo que representa únicamente el 3.91% del total de residuos generados, mientras que la capacidad de los sitios controlados no es suficiente para captar el total de los residuos generados en el país, por lo que se recurre a la disposición de éstos en 161 sitios no controlados -10,725 ton-. Estos sitios no cumplen con la normatividad vigente para la correcta operación, mantenimiento y clausura del sitio, por lo que representa un riesgo a las poblaciones aledañas al mismo.

	Rellenos sanitarios	Rellenos de tierra controlados	Sitios controlados	Sitios no controlados	Sitios no controlados más reciclaje
Número	137	24	161	-	-
Capacidad (miles de ton.)	22,175.10	3,924.90	26,100.00	10,725.00	12,225.00

TABLA 2. NÚMERO DE INSTALACIONES Y CAPACIDAD DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS. (SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES, 2010)

Así mismo, la composición de los residuos que se generan ha cambiado a través del tiempo, aumentando en un alto porcentaje los residuos de difícil degradación, debido a su bajo costo y aceptación social. Así, actualmente la composición de los residuos del país se muestra como en la Figura 1, siendo la basura orgánica el 52.42% del total, el papel, cartón y otros productos de papel el 13.83%, los plásticos el 10.89%, el vidrio el 5.88%, el aluminio el 1.73%, los

textiles el 1.43%, los metales ferrosos e. 1.08%, los metales no ferrosos el 0.63%, mientras que el 12.11% restante son otros residuos como pañales, residuos finos, etc. (SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES, 2010)

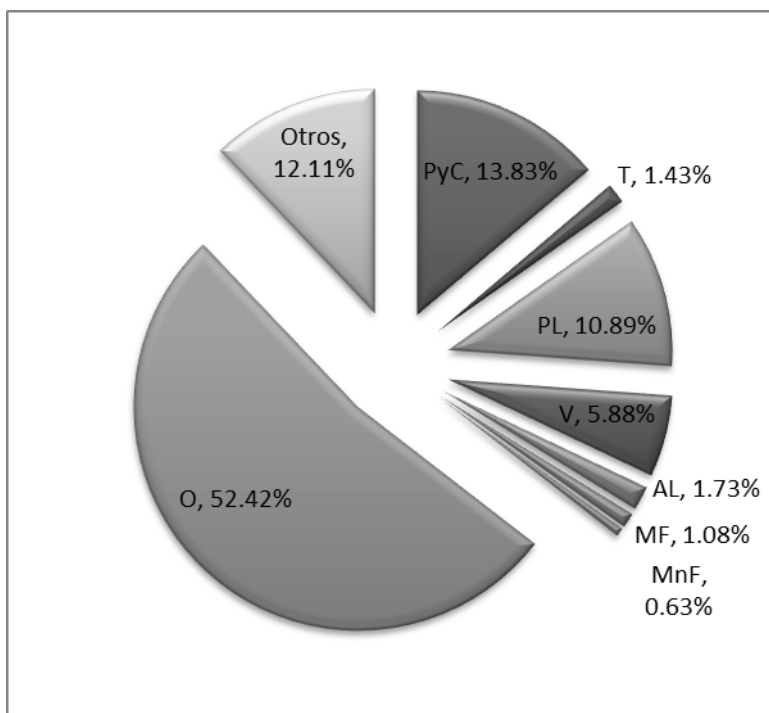


FIGURA 1. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS EN LA REPÚBLICA MEXICANA. (SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES, 2010)

En el manejo integral de los residuos sólidos urbanos existe una amplia variedad de posibilidades para las dos últimas etapas, el tratamiento y disposición de los residuos. Dentro de esas posibilidades se encuentran las tecnologías que tienen el potencial para generar energía a partir de las propiedades físicas químicas y biológicas de los residuos sólidos. Estas tecnologías se dividen en: tratamientos físicos-químicos, biológicos y termo-químicos.

Algunos ejemplos de los tratamientos físico-químicos son la compactación, trituración, separación (por tamaño, por densidad, magnética, óptica, etc.), solidificación, encapsulamiento, etc. Entre los tratamientos biológicos se encuentran la composta y la digestión anaerobia, y existen tratamientos que combinan estos dos tipos, como el tratamiento mecánico-biológico.

Este trabajo se enfoca en el análisis de los tratamientos termo-químicos (en adelante térmicos). Estos tipos de tratamientos se pueden clasificar de acuerdo a la cantidad de oxígeno presente durante el proceso de transformación de los residuos:

Pirólisis.

Tratamiento al que se someten los residuos a altas temperaturas (400-800 °C), en ausencia de oxígeno. Los productos de la pirólisis pueden ser de alto contenido energético como el carbón,

alquitrán, los gases de hidrógeno, nitrógeno, metano, etano, propano, butano, pentano, amoníaco, oxígeno, monóxido y bióxido de carbono que pueden ser utilizados como combustibles, además de aceites ligeros (mezclas de benceno, tolueno, xileno y otros), sales y metales reducidas que se pueden usar como materias primas en otros procesos.

Incineración.

Combustión total y controlada de los residuos a altas temperaturas (900-1600 °C), en una atmósfera oxidante y turbulenta, logrando la oxidación de los compuestos y elementos combustibles presentes. Como resultado de la incineración se tienen las escorias y las cenizas, que si el proceso se ha realizado adecuadamente, tienen un carácter inerte, por lo que una vez separados los metales se pueden utilizar para obra civil o depositar en rellenos sanitarios de inertes.

Gasificación.

Tratamiento donde se somete a los residuos, los cuales deben tener un alto porcentaje de compuestos carbonosos, algunos a temperaturas muy elevadas con una cantidad limitada y controlada de oxígeno. La gasificación se puede realizar a temperaturas desde los 700 hasta los 20,000 °C (Gomez, Amutha Rani, Cheeseman, Deegan, Wise, & Boccaccini, 2009), dependiendo de la tecnología que se emplee. Como resultado de la gasificación se obtiene principalmente un gas de síntesis que puede ser utilizado como combustible para la generación de energía eléctrica. Existen actualmente, diversos sistemas de gasificación, en este trabajo se contemplan sólo la gasificación convencional y la gasificación por arco de plasma.

Algunos de los beneficios de los tratamientos térmicos son la reducción significativa del volumen y peligrosidad de los residuos, sin embargo, la principal ventaja de la aplicación de este tipo de tratamientos a los residuos sólidos urbanos es la posibilidad de generación de energía eléctrica, ya sea para el auto-consumo de la planta de tratamiento o para la venta de energía eléctrica.

Algunos de los beneficios que se tienen al buscar la generación de energía por medio del tratamiento de los residuos sólidos municipales son:

- Beneficiar a los municipios transformando sus residuos sólidos en energía eléctrica, que puede comercializarse en la zona y ahorrar, por ejemplo, en el costo de electricidad para el alumbrado público, reduciendo el uso de recursos no renovables.
- Reducir costos de operación y manejo de residuos.
- Reducir el volumen de residuos a confinar, reduciendo así el espacio requerido para la construcción de rellenos sanitarios, evitando así la afectación de propiedades linderas.
- Reducir la proliferación de vectores y la morbilidad de sus habitantes.
- Revertir el impacto ecológico inherente a los residuos sólidos urbanos en el aprovechamiento de los mismos.
- Evitar ampliar el pasivo ecológico.

- Reducir la contaminación de cauces, corrientes y cuerpos de agua, así como del suelo y aire.

Un factor importante para la generación de energía a partir del tratamiento de los residuos sólidos urbanos es el contenido energético o poder calorífico, el cual indica la cantidad de calor que puede entregar un cuerpo, para así saber si el residuo es apto para producir energía o sólo consumirá una mayor energía y hará que el proceso sea menos rentable. En la Tabla 3 se observan algunos valores de este factor para los residuos sólidos más comunes.

Tipo de Residuo	Contenido Energético (kcal/kg)
Residuos de comida mezclados	998
Papel mezclado	3777
Cartón	3912
Plásticos mezclados	7834
Textiles	4422
Goma	6050
Cuero	4167
Residuos de jardín	1445
Madera mezclada	3689
Vidrio	47
Latas de hojalata	167
Metales	-

TABLA 3. CONTENIDO CALORÍFICO TÍPICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS. (TCHOBANOGLIOUS & THEISEN, 1996)

Debido a esto, los tratamientos térmicos deben ser siempre acompañados de un pre-tratamiento o acondicionamiento de los residuos sólidos, esto con el fin de obtener la fracción de los residuos de nuestro interés. Estos pre-tratamientos pueden ir desde la separación manual de los residuos, operaciones de acondicionamiento como trituración, compactación, hasta operaciones más complejas de separación por ejemplo, por densidad, por tamaño, magnética, por corrientes de Foucault, separación óptica, etc. El objetivo de este acondicionamiento de materiales es el de ingresar el mayor porcentaje posible de residuos que cumplan con los requerimientos del tratamiento.

1.2 Planteamiento del problema y justificación de la investigación.

En México, de acuerdo al Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009 - 2012 (PNPGIR), se genera un total de 94,800 toneladas de Residuos Sólidos Urbanos, de los cuales se estima que se recolecta el 87%, de los cuales el 64% es enviado a 88 rellenos sanitarios y 21 sitios controlados, mientras que el resto es dispuesto en tiraderos a cielo abierto o sitios no controlados.

En este mismo programa, se espera obtener como resultado de la aplicación del programa la construcción de infraestructura para el aprovechamiento tanto material como térmico de los residuos sólidos urbanos, como se puede apreciar en el inciso i) de la Tabla 4.

Infraestructura considerada en el Programa:
a) Regularización o clausura de 30 tiraderos a cielo abierto.
b) Construcción de 50 rellenos sanitarios con capacidad de recepción mínima de 300 ton diarias.
c) Construcción de 50 plantas de selección cada una con capacidad de procesamiento de 300 ton diarias.
d) Promoción de 32 plantas de tratamiento o aprovechamiento de residuos orgánicos.
e) Promoción de 143 proyectos de aprovechamiento de biogás de excretas pecuarias.
f) Adquisición o renovación de 50 equipos y/o parque vehicular para proyectos regionales o intermunicipales que incluye contenedores, camiones recolectores, transfers, etc.
g) Construcción de 50 estaciones de transferencia.
h) Promoción para la construcción de 2 Centros Integrales de Reciclaje y Aprovechamiento.
i) Promoción para la construcción de 2 plantas de Aprovechamiento Térmico.
j) Promoción de 40 proyectos de disposición final con aprovechamiento o combustión de biogás en esquemas MDL.

TABLA 4. INFRAESTRUCTURA CONSIDERADA EN EL PROGRAMA NACIONAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS 2009-2012.

Estos antecedentes indican la importancia de promover una tendencia y una concientización de las autoridades para la optimización de la gestión de los residuos sólidos urbanos, impulsando en todo el país actividades encaminadas a la mejora de cada una de las etapas de la gestión de los mismos.

Actualmente en nuestro país no existe una diversificación de las tecnologías utilizadas para el tratamiento y disposición de residuos sólidos. Los municipios se encuentran en la disyuntiva de elegir entre gran número de empresas que ofrecen una amplia variedad de tecnología para el tratamiento y disposición final de residuos sólidos, algunas cuya utilidad y eficacia ya han sido comprobadas, pero algunas otras están en fase piloto.

Esto justifica la realización de un estudio para seleccionar y parametrizar los criterios de evaluación de tres tecnologías para el tratamiento de residuos sólidos urbanos con potencial para la generación de energía para su posible instalación en la República Mexicana.

Con base en estos criterios se desarrolla una herramienta computacional para obtener una primera evaluación de la tecnología y determinar la viabilidad de la misma en la localidad en cuestión.

Este estudio está acotado a los tratamientos térmicos de incineración, gasificación convencional y gasificación con arco de plasma, estos tres con potencial para la generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos.

1.2.1 Justificación

El propósito de este estudio es proporcionar una herramienta de criterio a los municipios para la toma de decisiones al momento de elegir la tecnología más adecuada para el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos generados por los habitantes del municipio, ya que en ocasiones, empresas dedicadas al manejo de residuos ofrecen tecnologías que prometen terminar con el “problema de los residuos”. Sin embargo, por lo general estas soluciones tecnológicas sólo se encargan de algunos componentes de los residuos sólidos urbanos, sin indicar al municipio qué hacer con los restantes componentes, o en otras ocasiones no dan la solución más adecuada tanto ambiental, tecnológica como económicamente.

La finalidad del trabajo es diseñar una herramienta útil para avanzar en el desarrollo de la política ambiental, dirigido a los responsables políticos y a los agentes sociales para ayudar en la toma de decisiones en la selección de las tecnologías de tratamiento de residuos sólidos.

1.3 Objetivo general.

Proponer una herramienta cuantitativa para hacer una primera evaluación de la aplicación de tratamientos térmicos de residuos sólidos urbanos con potencial para la generación de energía desarrollando indicadores de impacto ambiental, social, económico y técnico.

1.3.1 Objetivos particulares:

Identificar las principales variables ambientales, económicas, sociales y técnicas que intervienen en la selección de las tecnologías para el tratamiento térmico-químico de los residuos sólidos urbanos con potencial para la generación de energía eléctrica.

Elegir los criterios de selección para las tecnologías de tratamiento térmicos.

Desarrollar los indicadores de impacto ambiental, social, económico y técnico con el fin de reflejar la compatibilidad de la tecnología y la localidad.

Evaluar las tecnologías mediante la utilización de datos cuantitativos tanto de la tecnología como de la localidad.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO.

En este capítulo se analiza la legislación nacional en materia ambiental, de salud y de energía que regulan los procesos, productos y sub-productos de los tratamientos de interés para este trabajo, los tratamientos térmicos. Adicionalmente se analizan y comparan los ordenamientos internacionales aplicables.

Igualmente, en este capítulo se analiza el estado del arte de los tratamientos térmicos de pirólisis, incineración, gasificación y gasificación por arco de plasma; describiendo así los procesos que los componen, así como los pre-tratamientos y post-tratamientos requeridos. Así mismo, se describen los productos principales, los productos secundarios y los residuos que generan los tratamientos.

2.1 Marco Regulatorio.

A continuación se mencionan los ordenamientos jurídicos que son aplicables a nivel nacional para proyectos de tratamientos térmicos con generación de energía eléctrica. Se analizan la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, así como todas aquellas Leyes, Reglamentos y Normas que regulan cada una de las etapas de los tratamientos térmicos en materia ambiental y energética. Igualmente, en la segunda parte, se hace una revisión de los ordenamientos internacionales que regulan este tipo de tratamientos.

2.1.1 Marco regulatorio nacional en materia ambiental.

Dentro de la regulación nacional se puede mencionar dentro de los principales ordenamientos la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, el Reglamento de la LGEEPA, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos, el Reglamento de la LGPGIR, las Leyes Ambientales Estatales, los Reglamentos de las Leyes Estatales, las Normas Oficiales Mexicanas y las Normas Mexicanas. En la Tabla 5 están enlistados estos ordenamientos junto con una breve descripción.

2.1.1.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Este ordenamiento marca las pautas generales para el cuidado del medio ambiente. En los artículos 25, 27 y 73 menciona la importancia del cuidado del medio ambiente, de la conservación de los recursos naturales y de la prevención y control de la contaminación ambiental.

En su artículo 115, establece que los estados y municipios tienen a su cargo los servicios públicos, dentro de los que se encuentran los servicios de limpia recolección, traslado, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos.

Instrumento	Órgano	Descripción
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	Gobierno Federal	Establece el derecho de los mexicanos a la salud; plantea el cuidado y conservación del medio ambiente y la prevención y control de la contaminación ambiental. Establece las atribuciones de los Estados y municipios en la gestión de los residuos sólidos urbanos.
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	Gobierno Federal	Plantea que los sistemas de manejo y disposición de residuos sólidos no peligrosos quedan sujetos a autorización y legislación estatal o en su caso, municipal; y la disposición final de los residuos sólidos no peligrosos, mediante rellenos sanitarios
Reglamento de la LGEEPA		
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	Gobierno Federal	Indica que los servicios públicos municipales deben ser prestados por los ayuntamientos
Reglamento de la LGPGIR		

TABLA 5. MARCO NORMATIVO APLICABLE EN MATERIA AMBIENTAL (ELABORACIÓN PROPIA).

Instrumento	Órgano	Descripción
Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en Materia Ambiental	Gobierno Federal	Establecen la forma y procedimientos aplicables al manejo y disposición de residuos sólidos no peligrosos
Normas Técnicas Mexicanas (NMX) en Materia Ambiental		
Leyes Estatales en Materia Ambiental	Gobierno Local	Establece disposiciones de observancia obligatoria para cada estado, teniendo como objetivo la prevención, preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como los fundamentos para el manejo y disposición final de los residuos sólidos no peligrosos
Reglamentos Locales		
Normas Ambientales Locales		

TABLA 5. MARCO NORMATIVO APLICABLE EN MATERIA AMBIENTAL (ELABORACIÓN PROPIA) (CONT.).

2.1.1.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

Esta ley se refiere a la preservación y restauración del equilibrio ecológico y de la protección ambiente. Esta ley tiene efecto en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social.

En su artículo 5 establece que son facultades de la Federación: “La regulación de la contaminación de la atmósfera, proveniente de todo tipo de fuentes emisoras, así como la prevención y el control en zonas o en caso de fuentes fijas y móviles de jurisdicción federal”, fracción XII.

“El fomento de la aplicación de tecnologías, equipos y procesos que reduzcan las emisiones y descargas contaminantes provenientes de cualquier tipo de fuente, en coordinación con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios; así como el establecimiento de las disposiciones que deberán observarse para el aprovechamiento sustentable de los energéticos”, fracción XIII.

En su artículo 7 menciona las facultades que corresponden a los Estados, son del interés de este trabajo: “La prevención y control de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, así como por fuentes móviles, que conforme a lo establecido en esta Ley no sean de competencia Federal”, fracción III;

“La regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos...”, fracción VI;

“La prevención y el control de la contaminación generada por la emisión de ruido, vibraciones, energía térmica, lumínica, radiaciones electromagnéticas y olores perjudiciales al equilibrio ecológico o al ambiente, proveniente de fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, así como, en su caso, de fuentes móviles...”, fracción VII;

“La evaluación del impacto ambiental de las obras o actividades que no se encuentren expresamente reservadas a la Federación, por la presente Ley y, en su caso, la expedición de las autorizaciones correspondientes, de conformidad con lo dispuesto por el artículo 35 BIS 2 de la presente Ley”, fracción XVI;

En su artículo 8 se refiere a las facultades de los Municipios. Los relacionados con este trabajo son: La aplicación de las disposiciones jurídicas establecidas en el artículo 7 fracciones III, VI, VII.

Los artículos 111 y 111 BIS establecen como facultades de la Secretaría para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera. Entre estas facultades se encuentran la elaboración y expedición de normas oficiales mexicanas para las concentraciones máximas permisibles de los distintos contaminantes, integrar y mantener actualizado el inventario de emisoras de contaminantes, así como exigir su cumplimiento; promover sistemas de derechos transferibles de emisión de contaminantes a la atmósfera, así como promover ante los responsables de la operación de fuentes contaminantes, la aplicación de nuevas tecnologías.

Igualmente, el artículo 112 establece la jurisdicción de los Estados, municipios y el Distrito Federal sobre la prevención y control de la contaminación en el ámbito local.

En su artículo 134 menciona que los residuos sólidos son la principal fuente de contaminación del suelo, por lo que: “es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes”, fracción III.

En el artículo 135 indica los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo entre los que considera: “La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios”, fracción II; y “La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen”, fracción III.

Así, en el artículo 137 asigna la facultad a los Municipios, así como al Distrito Federal, “el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales...”.

El artículo 138 establece como competencia de la Secretaría el promover la celebración de acuerdos de coordinación y asesoría entre los gobiernos estatales y municipales para la implantación y mejora de los sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos municipales, e identificación de las alternativas de reutilización y disposición de estos, incluyendo la elaboración de un inventario de los mismos y sus fuentes generadoras.

2.1.1.3 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos.

La primera mención sobre la regulación de las tecnologías que son objeto de este estudio es su clasificación y definición dentro de los ordenamientos jurídicos. La LGPGIR en su artículo 5, fracción XLII, considera la gasificación, así como la pirólisis –la cual queda fuera de este estudio– como procesos de termólisis.

Igualmente, indica, en su artículo 50, fracción IX, que se requiere autorización por parte de la Secretaría para la utilización de tratamientos térmicos de residuos por termólisis. Y de acuerdo al artículo 61, esta autorización especificará las medidas para dar cumplimiento a las normas oficiales mexicanas que se expidan.

En el artículo 62 menciona que en las normas oficiales mexicanas correspondientes “...se estipularán los grados de eficiencia y eficacia que deberán alcanzar los procesos, y los parámetros ambientales que deberán determinarse a fin de verificar la prevención o reducción de la liberación al ambiente de sustancias contaminantes, particularmente de aquellas que son tóxicas. En los citados ordenamientos se incluirán especificaciones respecto a la caracterización analítica de los residuos susceptibles de incineración, así como de las cenizas resultantes de la misma, y al monitoreo periódico de todas las emisiones sujetas a normas oficiales mexicanas, cuyos costos asumirán los responsables de las plantas de incineración”.

En su artículo 63 dice: “La Secretaría, al reglamentar y normar la operación de los procesos de incineración y co-procesamiento de residuos permitidos para tal efecto, distinguirá aquellos en los cuales los residuos estén sujetos a un co-procesamiento con el objeto de valorizarlos mediante su empleo como combustible alternativo para la generación de energía, que puede ser aprovechada en la producción de bienes y servicios”.

Cabe mencionar que para el objetivo de este trabajo, es importante considerar la disposición de la información, por lo que el artículo 96 en su fracción V, es de interés, ya que menciona

que es competencia de las entidades federativas y los municipios “Integrar la información relativa a la gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, al Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales”; así como “Coordinarse con las autoridades federales, con otras entidades federativas o municipios, según proceda, y concertar con representantes de organismos privados y sociales, para alcanzar las finalidades a que se refiere esta Ley y para la instrumentación de planes de manejo de los distintos residuos que sean de su competencia”, fracción VII.

2.1.1.4 Normas Mexicanas.

Las Normas Mexicanas en materia de residuos sólidos se enfocan principalmente a determinaciones diversas a nivel de laboratorio. Las referentes a residuos sólidos son las enlistadas en la Tabla 6.

Norma Técnica Mexicana	Descripción
NMX-AA-10-SCFI-2001	Determinación de la emisión de partículas contenidas en los gases que fluyen por un conducto.
NMX-AA-15-1985	Muestreo. Método del Cuarteo.
NMX-AA-16-1984	Determinación de humedad.
NMX-AA-18-1984	Determinación de cenizas.
NMX-AA-19-1985	Peso Volumétrico in Situ.
NMX-AA-21-1985	Determinación de materia orgánica.
NMX-AA-22-1985	Selección y cuantificación de subproductos.
NMX-AA-24-1984	Determinación de nitrógeno total.
NMX-AA-25-1984	Determinación de pH. Método potenciométrico.
NMX-AA-33-1985	Determinación del poder calorífico superior.
NMX-AA-52-1985	Preparación de muestras en laboratorio para su análisis.
NMX-AA-55-1979	Determinación de bióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto.
NMX-AA-61-1985	Determinación de la generación.
NMX-AA-67-1985	Determinación de la relación carbono/nitrógeno.
NMX-AA-68-1986	Determinación de hidrógeno a partir de materia orgánica.
NMX-AA-70-1980	Determinación de cloro y/o cloruros en los gases que fluyen por un conducto.
NMX-AA-80-1986	Determinación del porcentaje de oxígeno en materia orgánica.
NMX-AA-90-1986	Determinación de oxígeno.
NMX-AA-91-1987	Calidad del suelo. Terminología.
NMX-AA-92-1984	Determinación de azufre.
NMX-AA-94-1985	Determinación de fósforo total.

TABLA 6. NORMAS TÉCNICAS MEXICANAS EN MATERIA DE RESIDUOS SÓLIDOS (ELABORACIÓN PROPIA).

2.1.1.5 Normas Oficiales Mexicanas.

A continuación se muestran las normas oficiales mexicanas referentes a los residuos sólidos y a la contaminación del aire, las cuales se enlistan en la Tabla 7.

Norma Oficial Mexicana	Descripción
NOM-034-SEMARNAT-1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
NOM-035-SEMARNAT-1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
NOM-037-SEMARNAT-1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de nitrógeno totales en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
NOM-038-SEMARNAT-1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre totales en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
NOM-043-SEMARNAT-1993	Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.
NOM-052-SEMARNAT-2005	Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
NOM-113-SEMARNAT-1998	Especificaciones de protección ambiental para la planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de subestaciones eléctricas de potencia o de distribución que se pretendan ubicar en áreas urbanas, suburbanas, rurales, agropecuarias, industriales, de equipamiento urbano o de servicios y turísticas.
NOM-133-SEMARNAT-2000	Protección ambiental - bifenilos policlorados (bpcs) especificaciones de manejo.

TABLA 7. NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE RESIDUOS SÓLIDOS Y CONTAMINACIÓN DEL AIRE (ELABORACIÓN PROPIA).

El único ordenamiento jurídico que hace referencia directa a algún tratamiento térmico, es la Norma Oficial Mexicana 098, la cual regula el proceso de incineración de residuos.

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

En esta norma se estipulan los límites máximos permisibles de emisiones al aire para este tipo de instalaciones. En la Tabla 8 se muestran estos valores.

Contaminante	Límite de emisión	Frecuencia de medición	Norma que aplica o método
CO [mg/m ³]	63	Continuo	Infrarrojo no dispersivo y celda electroquímica
HCl [mg/m ³]	15	Semestral	NMX-AA-070-1980
NO _x [mg/m ³]	300	Semestral	Quimiluminiscencia
SO ₂ [mg/m ³]	80	Semestral	NMX-AA-055-1979
Partículas suspendidas [mg/m ³]	50	Semestral	NMX-AA-010-SCFI-2001
As, Se, Co, Ni, Mn, Sn [mg/m ³]	0.7	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Cd [mg/m ³]	0.07	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Pb, Cr, Cu, Zn [mg/m ³]	0.7	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Hg [mg/m ³]	0.07	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Dioxinas y furanos (instalaciones nuevas) [ng/m ³]	0.2	Anual	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución
Dioxinas y furanos (instalaciones existentes) [ng/m ³]	0.5	Anual	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución

TABLA 8. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES PARA INSTALACIONES DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS (ELABORACIÓN PROPIA).

2.1.1.6 Programas y acuerdos nacionales.

2.1.1.6.1 Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PNPGIR)

Es un programa que formula e instrumenta la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en estricto apego y cumplimiento con lo que marca la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. El objetivo general del programa se establece como:

“Contribuir al desarrollo sustentable de México a través de una política ambiental de residuos basada en la promoción de cambios en los modelos de producción, consumo y manejo que fomenten la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos, de manejo especial, peligrosos y minero-metalúrgicos; a través de acciones de prevención y minimización de la generación, separación de residuos en la fuente, reutilización y reciclado, la valorización material y energética, hasta la disposición final restringida y apropiada de los residuos como última opción. Lo anterior, enmarcado en sistemas de gestión integral que incorporen esquemas de responsabilidad compartida y diferenciada de los diferentes actores de la sociedad, con acciones ambientalmente adecuadas, técnicamente factibles, económicamente viables y socialmente aceptables.” (SEMARNAT, 2009-2012)

En el capítulo sobre residuos sólidos urbanos se menciona como objetivo particular el llegar a “...una gestión integral involucre la modernización operativa y administrativa de los sistemas de recolección, tratamiento y disposición final, apoyados en tecnologías y de 3R's en corresponsabilidad con los diversos sectores de la sociedad.” (SEMARNAT, 2009-2012)

2.1.1.6.2 El Programa Especial de Cambio Climático (PECC)

Este programa es una iniciativa del Gobierno Federal, elaborada de manera voluntaria y con recursos propios, que muestra el interés de México para contribuir a la solución del problema del cambio climático, una de las mayores amenazas para el proceso de desarrollo, el bienestar humano y la integridad del capital natural.

2.1.2 Marco regulatorio nacional en materia de salud.

La Ley General de Salud contempla que, en materia de efectos del ambiente en la salud, las autoridades sanitarias establecerán las normas, tomarán medidas y realizarán las actividades a que se refiere esta misma Ley tendientes a la protección de la salud humana ante los riesgos y daños dependientes de las condiciones del ambiente, así como determinar, para los contaminantes atmosféricos, los valores de concentración máxima permisible para el ser humano.

Para prevenir, restablecer y mantener la calidad de aire, se realizarán acciones para reducir la emisión de contaminantes. Los valores criterio de calidad del aire, establecen límites sobre concentraciones de diversos contaminantes, con base en la protección de la salud de la población, iniciando con la más susceptible, y son parámetros de vigilancia de la calidad del aire ambiente. Establecen la referencia para la formulación de programas de control y evaluación de los mismos.

Los valores límite permisibles de concentración de algunos contaminantes en el ambiente para la protección de la salud humana se encuentran establecidos en las normas oficiales mexicanas enlistadas en las Tabla 10 y Tabla 10.

Norma Oficial Mexicana	Descripción
NOM-020-SSA1-1993	Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O ₃) de la calidad del aire ambiente. Criterio para evaluar la calidad del aire.
NOM-036-ECOL/1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
NOM-022-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO ₂). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO ₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

TABLA 9. NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE SALUD (ELABORACIÓN PROPIA).

Norma Oficial Mexicana	Descripción
NOM-CCAM-005-ECOL/1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
NOM-035-ECOL-1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición.
NOM-025-SSA1-1993	Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM10 y partículas menores de 2.5 micrómetros PM2.5 de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire.
NOM-026-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.
NOM-CCAM-001-ECOL /1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
NOM-023-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de nitrógeno (NO ₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO ₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.
NOM-CCAM-004-ECOL/1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de nitrógeno en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

TABLA 10. NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE SALUD (ELABORACIÓN PROPIA).

2.1.3 Marco regulatorio en materia de generación de energía.

Estos tratamientos tienen la capacidad y el atractivo de producir energía eléctrica a partir de los residuos. Esta generación se encuentra igualmente normada. La normatividad aplicable para la generación de energía eléctrica se enlista en la Tabla 11.

Legislación Aplicable a la Generación de Energía Eléctrica.			
Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.	Art. 36	Fracc. I, II, III, VI y V.	La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, otorgará permisos de autoabastecimiento, de cogeneración, de producción independiente, de pequeña producción o de importación o exportación de energía eléctrica.
	Art. 37	Incisos a, b y c.	Dicta las obligaciones a las que se compromete el titular de los permisos a los que se refiere el artículo 36.
	Art. 40	Fracc. V y VI.	Sobre las sanciones aplicables.
Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica	<p>Establece los derechos, obligaciones, permisos, inspecciones y sanciones a los que se sujetan tanto los permisionarios como las autoridades e instituciones correspondientes.</p> <p>Así también habla sobre las remuneraciones, los convenios para la adquisición de energía eléctrica y la exportación de la energía eléctrica</p>		

TABLA 11. LEGISLACIÓN APLICABLE A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (ELABORACIÓN PROPIA).

2.1.4 Marco Regulatorio Internacional.

2.1.4.1 Unión Europea.

La legislación internacional aplicable a estos tratamientos puede ser útil en la mejor gestión ambiental de los tratamientos, siendo generalmente normatividad que cubre un mayor número de factores y parámetros, por lo que se puede tener un desempeño ambientalmente adecuado. En la Tabla 12 se mencionan las directivas de la Unión Europea, así como los convenios internacionales relacionados con tratamientos térmicos.

Directivas de la Unión Europea en materia de Incineración.	
DIRECTIVA 89/369/CE	Prevención de la contaminación atmosférica procedente de nuevas instalaciones de incineración de residuos municipales.
DIRECTIVA 89/429/CE	Contaminación atmosférica procedente de instalaciones existentes de incineración de residuos municipales.
DIRECTIVA 94/67/CE	Incineración de residuos peligrosos.
DIRECTIVA 2000/76/CE	Relativa a la incineración de residuos.
DIRECTIVA 2008/98/CE	Sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
Convenios Internacionales	
La convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.	Promover y apoyar con su cooperación el desarrollo, la aplicación y la difusión, incluida la transferencia, de tecnologías, prácticas y procesos que controlen, reduzcan o prevengan las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal en todos los sectores pertinentes, entre ellos la energía, el transporte, la industria, la agricultura, la silvicultura y la gestión de desechos.
Convenio de Estocolmo (2004)	Proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los contaminantes orgánicos persistentes (COP's). Medidas generales de prevención relativas a las mejores técnicas disponibles y a las mejores prácticas ambientales.
Programa Piloto de contabilidad y reporte de Gases Efecto Invernadero en México	Programa voluntario de contabilidad y reporte de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), fundamentado en los Estándares de la "Iniciativa del Protocolo de Gases Efecto Invernadero", el Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte (Edición Revisada) y el Protocolo de GEI para Cuantificación de Proyectos

TABLA 12. LEGISLACIÓN EUROPEA EN MATERIA DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS (ELABORACIÓN PROPIA).

En la Directiva 2000/76/CE, en su Anexo II, los límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de las sustancias contaminantes. En la Tabla 13 se reproducen los valores de estos límites.

Sustancia contaminante	Concentración [mg/m ³]
Partículas suspendidas	30
HCl	10
HF	1
NO _x para plantas existentes	800
NO _x para plantas nuevas	500
Cd + Tl	0.05
Hg	0.05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V	0.5
SO ₂	50
Carbono Orgánico Total	10
Dioxinas y furanos [ng/m ³]	0.1

TABLA 13. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA (DIRECTIVA 2000/76/CE).

2.1.4.2 Estados Unidos.

La Agencia para la Protección al Ambiente de los Estados Unidos de América (USEPA) es la encargada de regular todo lo referente al medio ambiente en dicho país. El ordenamiento propio de los procesos de tratamiento térmico de los residuos sólidos se encuentra estipulados en el Código Federal de Regulaciones, título 40, parte 240.

Ésta se ocupa sobre cada una de las partes que intervienen en los tratamientos térmicos, como lo son: los residuos aceptados, los residuos rechazados, la selección del sitio, el diseño general, la calidad del agua de descarta, la calidad del aire en sus emisiones, la prevención de vectores, la estética de las instalaciones, los residuos del tratamiento, la seguridad, la operación general, los registros y monitoreo del tratamiento.

Este ordenamiento hace referencia a las partes 52, 60, 61, y 76, así como a la Clean Air Act (Ley de Aire Limpio), para establecer y vigilar los límites máximos permisibles para las emisiones de sustancias contaminantes en instalaciones de tratamientos térmicos.

En el título 40, parte 60 del Código Federal de Regulaciones están enlistados los valores de los límites máximos permisibles para las emisiones de incineradores y hornos para residuos sólidos. En la Tabla 14 se reproducen estos valores.

	Incineradores		Hornos para residuos
	Construidos entre 99-2010	Construidos a partir de 2010	Construidos a partir de 2010
Cd [mg/m ³]	0.004	0.0023	0.00048
CO [ppm]	157	12	90
Dioxinas y furanos [ng/m ³]	0.41	0.13	0.003
HCl [ppm]	62	0.091	3
Pb [mg/m ³]	0.04	0.0019	0.0026
Hg [mg/m ³]	0.47	0.00016	0.0062
NO _x [ppm]	388	23	200
Partículas suspendidas [mg/m ³]	70	18	2.5
SO ₂ [ppm]	20	11	38

TABLA 14. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES AL AIRE (EPA, 2010).

2.1.5 Comparación de los límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos.

En la Tabla 15 se muestran los distintos límites máximos permisibles de sustancias contaminantes para procesos de incineración de residuos en la regulación de los Estados Unidos, la Unión Europea y México.

En esta tabla se puede observar que los límites son más estrictos en la normatividad estadounidense para plantas nuevas, mientras que los valores para nuestro país están por arriba de los valores de las otros dos regiones, excepto los NO_x, los cuales están por debajo de los valores de la Unión Europea.

Estados Unidos				Unión Europea		México	
Contaminante	Incineradores		Hornos para residuos	Contaminante	Límite de emisión	Contaminante	Límite de emisión
	Construidos entre 99-2010	Construidos a partir de 2010	Construidos a partir de 2010				
Cd [mg/m ³]	0.004	0.0023	0.00048	Cd + Tl [mg/m ³]	0.05	Cd [mg/m ³]	0.07
CO [ppm]	157	12	90	Carbono Orgánico Total [mg/m ³]	10	CO [mg/m ³]	63
HCl [ppm]	62	0.091	3	HCl [mg/m ³]	10	HCl [mg/m ³]	15
Pb [mg/m ³]	0.04	0.0019	0.0026	Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V [mg/m ³]	0.5	As, Se, Co, Ni, Mn, Sn [mg/m ³]	0.7
						Pb, Cr, Cu, Zn [mg/m ³]	0.7
Hg [mg/m ³]	0.47	0.00016	0.0062	Hg [mg/m ³]	0.05	Hg [mg/m ³]	0.07
NO _x [ppm]	388	23	200	NO _x (plantas existentes) [mg/m ³]	800	NO _x [mg/m ³]	300
				NO _x (plantas nuevas) [mg/m ³]	500		

Partículas suspendidas [mg/m3]	70	18	2.5	Partículas suspendidas [mg/m3]	30	Partículas suspendidas [mg/m3]	50
SO ₂ [ppm]	20	11	38	SO₂ [mg/m3]	50	SO₂ [mg/m3]	80
Dioxinas y furanos [ng/m3]	0.41	0.13	0.003	Dioxinas y furanos [ng/m³]	0.1	Dioxinas y furanos (instalaciones nuevas) [ng/m3]	0.2
						Dioxinas y furanos (instalaciones existentes) [ng/m3]	0.5

TABLA 15. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES PARA INSTALACIONES DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS EN E.U., U.E. Y MÉXICO (ELABORACIÓN PROPIA).

2.2 Revisión del estado del arte de los tratamientos térmicos.

La gestión actual de los residuos sólidos urbanos en México se ha desarrollado principal y mayormente mediante el confinamiento de los residuos, ya sea en rellenos sanitarios, sitios controlados o en tiraderos a cielo abierto. Estos métodos se están convirtiendo en los menos apropiados para esta etapa de la gestión, dado el gran volumen de generación de residuos y el poco espacio para la construcción de estos sitios, además de los problemas sociales y ambientales que conlleva la operación de estas instalaciones.

Por esta razón es necesaria la implementación de nuevos métodos más apropiados para esta última etapa de la gestión de residuos. Este estudio se enfoca a los tratamientos térmicos de los residuos sólidos urbanos, tratamientos que podrían sustituir los métodos actualmente en uso. Los tratamientos más utilizados a nivel mundial son: pirólisis, incineración, gasificación y gasificación con arco de plasma.

2.2.1 Descripción del tratamiento de Pirólisis.

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición de la materia orgánica por la acción del calor y en ausencia de oxígeno en un medio reductor. La propia concepción de la pirólisis implica un aporte térmico que, aunque puede tener diferentes orígenes, es lógico suponer que se lleve a cabo con el mismo material que se está tratando.

La descomposición térmica se produce a través de una compleja serie de reacciones químicas, además de procesos de transferencia de masa y calor, lo que hace difícil predecir el transcurso del proceso de pirólisis, puesto que en él influyen una serie de variables como son las condiciones de operación o el tipo de biomasa empleado.

En el proceso de pirólisis se puede advertir varias etapas de la descomposición térmica de la materia:

- Hasta los 200 °C se produce una pérdida de agua y de otros productos volátiles.
- Entre los 200 y los 250 °C los constituyentes menos estables de la biomasa se descomponen con desprendimiento de agua y óxidos de carbono, formándose hidrocarburos líquidos oxigenados (alcoholes y ácidos).
- Hacia los 275 °C se genera la mayor parte de los hidrocarburos líquidos, reacción que, al ser exotérmica, recalienta la masa hasta 300 - 350 °C.
- Por encima de los 300 °C comienza la formación de productos carbonosos de alto peso molecular como los alquitranes y coque.

La naturaleza y composición de los productos finales dependen de las propiedades de la biomasa tratada, de la temperatura y de la presión de operación, y de los tiempos de retención del material en el reactor.

2.2.1.1 Residuos que pueden ser tratados.

Las materias primas que se investigan actualmente para desarrollar esta técnica son, esencialmente, los subproductos agrícolas y forestales y los residuos sólidos urbanos. Es por esto que se han realizado numerosas investigaciones para permitir la alimentación de

residuos, con la opción del tratamiento integral o de hacer una clasificación previa para separar los materiales inorgánicos, vidrios y metales, y someter a pirólisis sólo la fracción orgánica.

Sin embargo, algunos autores recomiendan su uso para:

- Lodos viscosos y/o muy abrasivos o de consistencia heterogénea, lo que dificulta su atomización
- Residuos que cambian durante el calentamiento, como es el caso de plásticos
- Residuos que contienen sales o metales que funden, o pueden volatilizarse durante el calentamiento.
- Residuos que dañan los equipos a las temperaturas de incineración o que emiten aerosoles
- Líquidos o lodos de alto contenido de cenizas
- Residuos almacenados en contenedores o tambores que no pueden ser drenados
- Inorgánicos volátiles, como NaCl, FeCl₂, Zn y Pb
- Residuos con alto contenido de cloro, azufre y/o nitrógeno

2.2.1.2 Productos de la pirólisis.

Generalmente, los productos de reacción se pueden clasificar en tres grandes grupos:

1. Un gas compuesto por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos gaseosos. Este gas puede ser utilizado posteriormente como combustible en otras partes del proceso.
2. Un líquido que, a la temperatura ambiente contiene compuestos hidrocarbonados complejos, entre los que destacan los de carácter oxigenado (alcoholes).
3. Un residuo sólido carbonoso que contiene carbones y alquitranes, así como cenizas.

De un modo muy general se puede decir que las condiciones de operación más adecuadas para producir mayoritariamente cada producto son:

Gas: Temperatura elevada. Gran velocidad de calentamiento. Reactores ideales: Lecho fluidizado y lecho fluidizado circulante.

Líquidos: Baja temperatura. Velocidad de calentamiento elevada. Pequeños tiempos de residencia del gas. Reactor ideal: Lecho fluidizado y de transporte.

Carbón: Baja temperatura. Pequeña velocidad de calentamiento. Tiempo de residencia de las partículas elevado. Reactores ideales: Hornos de apilamiento, de solera, hornos rotatorios, bandas transportadoras, etc. (BESEL, S.A., 2007)

Además del rendimiento a cada uno de los productos, la composición de los mismos varía con la temperatura.

En lo que respecta a los alquitranes, se observa que las relaciones H/C y O/C disminuyen con la temperatura.

Para el carbón vegetal, se observa que cuanto más elevada es la temperatura, menor es el rendimiento, como consecuencia de la pérdida de volátiles, aunque su poder calorífico es mayor, debido al mayor contenido en C. Asimismo, su estructura cambia notablemente, siendo más microporosa al aumentar la temperatura, lo que le confiere una menor resistencia mecánica. (Malkow, 2004)

2.2.2 Descripción del tratamiento de Incineración.

La incineración es un tratamiento térmico que se encarga de destruir los residuos mediante condiciones de combustión a altas temperaturas, atmósfera oxidante y turbulencia. El proceso de incineración está ilustrado en la Figura 2.

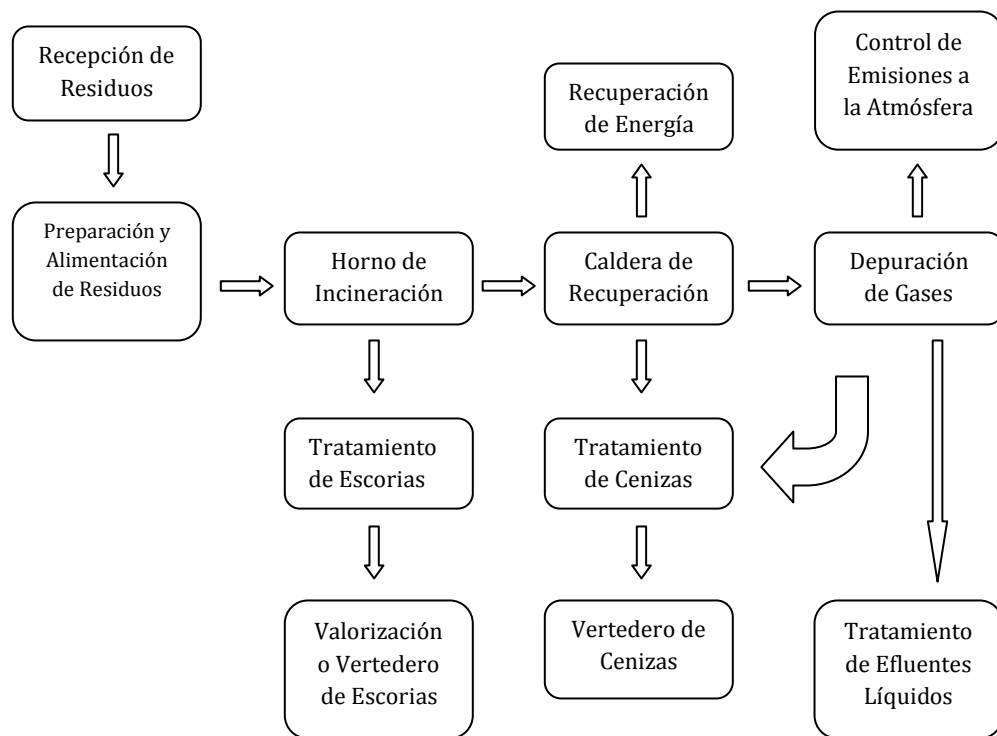


FIGURA 2. DIAGRAMA DEL PROCESO DE INCINERACIÓN (PLAN NACIONAL DE MANEJO DE DESECHOS.GOBIERNO DE COSTA RICA).

Con este tratamiento se reduce el volumen un 90% y su peso hasta en un 75%. De esta combustión resultan cenizas, escoria o residuos inertes y gases tóxicos.

Consiste en procesar materiales de origen orgánico, contenidos en los residuos sólidos, a alta temperatura y en presencia de oxígeno logrando de este modo la oxidación de los compuestos y elementos combustibles presentes con lo que se disminuye el volumen de los residuos pudiendo eventualmente generarse energía eléctrica mediante un aprovechamiento del calor o vapor producido por el sistema.

2.2.2.1 Preparación y alimentación de residuos.

Este tratamiento requiere de algunos procesos de pre-tratamiento y homogeneización de los residuos; estos pueden ser del tipo de separación de alguna de sus fracciones, ya sea manual o automática, o bien de homogeneización de su composición, tamaño o poder calorífico. Dado el tipo de residuos, prácticamente todos los hornos necesitan de algún sistema de trituración o cizallado para poder introducir los residuos de gran tamaño.

Existen residuos que por sus características no deberían ser incinerados. Dentro de estos residuos se tienen aquellos con altas concentraciones de arsénico, mercurio, flúor, bromo, yodo, plomo y compuestos orgánicos siliconados. Las plantas de incineración fijan los límites máximos de concentración de este tipo de sustancias en los residuos que ingresan al sistema.

2.2.2.2 Hornos de incineración.

La forma física del residuo y su contenido de cenizas determina el tipo de cámara de combustión a ser utilizado. Las temperaturas de operación están en el rango de 1000 a 1600°C y los tiempos de residencia entre 1,5 y 2 segundos. (Plan Nacional de Manejo de Desechos.Gobierno de Costa Rica)

El proceso de incineración requiere cuatro condiciones fundamentales dentro de la cámara de combustión para que la incineración de los residuos se lleve a cabo de una manera adecuada. Estas condiciones son las siguientes:

- Temperatura. La temperatura debe ser lo suficientemente alta para producir suficiente gases combustibles (temperatura de incineración).
- Turbulencia. El aire y el vapor deben estar eficientemente mezclados.
- Tiempo. La mezcla vapor-aire debe mantenerse a una temperatura suficientemente alta por el tiempo necesario para tener una oxidación completa (tiempo de residencia).
- Exceso de aire. Debe haber suficiente oxidante (aire) para que se realice la oxidación completa.

Tipos de hornos para incineradores.

1. Horno rotatorio.
2. Incinerador de rejilla fija.
3. Incinerador de lecho móvil.
4. Incinerador de lecho fluidizado.
5. Incinerador de sales fundidas
6. Incinerador de desechos líquidos.
7. Incinerador catalítico.
8. Incineradores de oxidación húmeda.
9. Incinerador de horno múltiple hogar.
10. Incinerador de cámara múltiple.

2.2.2.3 Recuperación de energía.

Los sistemas de recuperación de energía que generalmente se utilizan son:

- Calderas de agua caliente.
- Calderas de vapor de baja presión.
- Calderas de vapor de alta presión.

En estos sistemas se hacen pasar los gases calientes por el exterior de unos tubos, en cuyo interior circula agua y según las características del diseño se puede obtener agua caliente o vapor en diferentes condiciones de presión y temperatura.

Las calderas de agua se utilizan generalmente para calefacción de edificios, mientras que las calderas de vapor se utilizan para obtener energía eléctrica.

En el caso de la recuperación de energía en forma de corriente eléctrica, el vapor producido por la caldera deberá ser vapor recalentado y se utilizará para alimentar una turbina de condensación, provista de una extracción inmediata. El propósito de esta turbina es el de generar energía eléctrica y proporcionar vapor de media presión para las necesidades del ciclo de vapor y condensados de la planta. La energía se transformará en electricidad en un alternador trifásico conectado a la red de distribución después de elevar la tensión de la electricidad producida hasta los valores específicos de dicha red.

2.2.2.4 Depuración de gases.

A efectos de cumplir con los estándares de emisión que se manejan a nivel internacional, los incineradores deben contar con sofisticados sistemas de tratamiento de emisiones gaseosas y el correspondiente sistema de control. El sistema de tratamiento y control de emisiones constituye uno de los elementos clave en las plantas de incineración, siendo uno de los componentes mayoritarios del costo total.

Los sistemas de tratamiento deben garantizar la remoción de contaminantes tales como el ácido clorhídrico originado por la presencia de cloro en los residuos, cenizas volantes de muy pequeño diámetro (menores de 1 micra) y óxidos de azufre entre otros.

Los sistemas de tratamiento de emisiones más comunes cuentan con:

- *un enfriador (quenched) para el acondicionamiento térmico de los gases*
- *un lavador Venturi para la remoción de partículas*
- *una torre de absorción para la remoción de ácidos*
- *un eliminador de nieblas*

Las unidades cuentan generalmente con otros elementos de control como son los precipitadores electrostáticos húmedos, lavadores húmedos ionizantes, filtros de manga y ciclones. La remoción de dioxinas y furanos, así como posibles restos de mercurio residual, se realiza mediante filtros conteniendo mezclas adsorbentes (Boerrigter, y otros, 2004).

2.2.2.5 Residuos de incineración.

Entre los residuos que se generan en los procesos de incineración se destacan las escorias, que en el caso que el proceso se haya realizado adecuadamente, tienen un carácter inerte, por lo que una vez separados los metales se pueden utilizar para obra civil o depositar en vertederos de inertes.

También están las cenizas (tanto de la caldera como las volantes y las de depuración de los gases) y los efluentes líquidos de los procesos de depuración de gases húmedos. Las cenizas de depuración de gases contienen todos elementos contaminantes que se han separado de la corriente de gases, generalmente en forma de sales, por lo que se les debe dar un tratamiento específico, como es su inertización o la disposición en sitios adecuados, como pueden ser los depósitos de seguridad de residuos peligrosos.

El volumen de escorias puede representar del 20 al 25% en peso de los residuos tratados, mientras que las cenizas de caldera y volantes pueden suponer de un 2 al 3% en peso y las de depuración de gases de un 3 a un 5% en peso del total de residuos gestionados.

2.2.2.6 Riesgos asociados a los incineradores.

El proceso de la incineración se debe controlar continuamente, pues alguna deficiencia en él puede ocasionar una combustión incompleta o una baja eficiencia en los sistemas de tratamiento, produciendo emisiones perjudiciales para la salud de los pobladores de las cercanías o indirectamente por consumo de plantas o animales provenientes de áreas donde ocurre la deposición de las emisiones.

Se debe tener en cuenta que en las emisiones pueden aparecer compuestos más tóxicos que el producto originalmente incinerado, tal es el caso de las dibenzodioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados -dioxinas y furanos-. Estos contaminantes se han transformado en el elemento más controversial para la instalación de incineradores, sin embargo es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Las dioxinas y furanos son formadas en cualquier proceso de combustión, siendo más crítico si el proceso de combustión no es controlado.
- El desarrollo de la incineración y por ende la incorporación de tecnología más moderna ha incluido un sistema de enfriamiento rápido de los gases de combustión a efectos de prevenir la generación de estos contaminantes.
- La emisión de dioxinas y furanos estará condicionada tanto por el tipo de residuos a incinerar, el diseño del incinerador, los parámetros operativos del proceso como por el sistema de tratamiento de emisiones atmosféricas con que cuente la instalación.

La disposición incorrecta de cenizas y lodos generados en el tratamiento de las emisiones gaseosas también puede ser otra fuente de contaminación (De la Torre, 2009).

2.2.3 Descripción del tratamiento de Gasificación.

La gasificación es un proceso que convierte los materiales carbonosos, por ejemplo carbón, petróleo, o biomasa, en monóxido de carbono e hidrógeno, reaccionando la materia prima a temperaturas altas con una cantidad controlada de oxígeno. Se llama gas de síntesis o syngas a

la mezcla del gas que resulta y éste en sí mismo es un combustible. La gasificación es un método muy eficiente para extraer energía de muchos diversos tipos de materiales orgánicos, y también tiene usos como disposición final. La gasificación se basa en procesos químicos a temperaturas elevadas mayores a 700°C. En la Figura 3 se puede observar los procesos de la gasificación (Hofbauer, Fleck, Rauch, Mackinger, & Fercher, 1997).

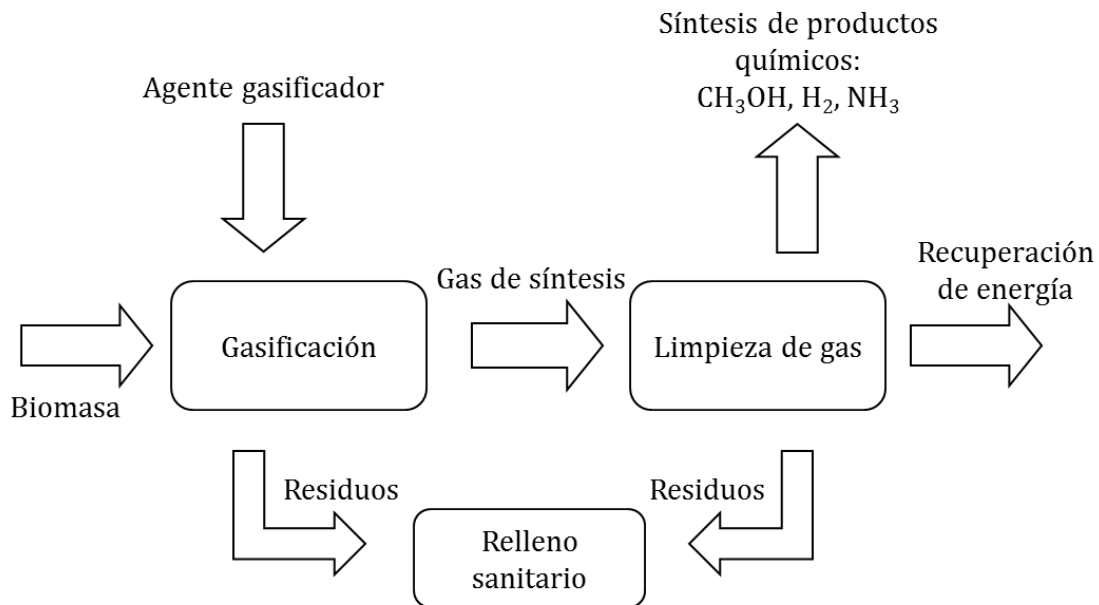


FIGURA 3. DIAGRAMA DE PROCESO DE GASIFICACIÓN. (HOFBAUER, FLECK, RAUCH, MACKINGER, & FERCHER, 1997)

En esencia la gasificación es el proceso de conversión de la biomasa sólida en un gas combustible que contiene monóxido de carbono e hidrogeno principalmente por medio de un proceso termoquímico. Este proceso se cumple en una cámara cerrada y sellada denominada Gasificador, que opera un poco por debajo de la presión atmosférica. Este proceso se desarrolla en varias etapas como sigue:

- Secado. En este proceso el agua contenida en la biomasa es removido a una temperatura superior a los 100°C.
- Pirólisis. Es el proceso en el cual la biomasa experimenta una descomposición térmica en ausencia de oxígeno. La pirolisis habitualmente es dividida en pirolisis lenta y pirolisis rápida.
- Oxidación. El aire es introducido en el proceso. A parte del oxígeno y del vapor de agua, algunos gases inertes también son adicionados. Este procedimiento se realiza entre 700- 2000°C.
- Reducción. En la zona de reducción, se presentan numerosas reacciones químicas a alta temperatura.

2.2.3.1 Tipos de gasificadores.

1. Gasificador de lecho fijo en contracorriente o updraft.
2. Gasificador de lecho fijo en corrientes paralelas o downdraft.

3. Gasificador de lecho fluidizado.
4. Gasificador de lecho arrastrado.

2.2.3.2 Tipo de residuos que pueden procesarse.

Por medio de la gasificación se pueden manejar una gran variedad de materiales. Algunos procesos específicos han sido optimizados para manejar ciertos residuos en particular, por ejemplo, gasificación de lodos de aguas residuales, mientras que otros procesos han sido diseñados para residuos mixtos como los Residuos Sólidos Urbanos. (Juniper Consultancy Services Ltd, 2009).

2.2.3.3 Productos de la Gasificación.

En la Tabla 16 están enlistados los principales productos de la gasificación, así como sus principales posibles usos. Estos productos varían en composición y tipo dependiendo de varios factores, como son el tipo de proceso y tecnología empleada y la composición de los residuos que se ingresan al sistema.

PRODUCTO	USOS
Gas de síntesis (55-60% del output)	Energía, Metanol, Hidrógeno, Amoniaco
Granulado mineral (igual en calidad al de la corteza terrestre, 15-20% del output)	Árido para hormigón, Chorro de Arena, Construcción de Carreteras.
Aleación Hierro-Cobre (1-3% del output)	Metalúrgica
Sal (1% del output)	Industria química, aditivo metalúrgico.
Azufre elemental (0.2-0.3% del output)	Industria química, ácido sulfúrico.
Concentrado de Zinc (0.2-0.3% del output)	Recuperación de Zinc.

TABLA 16 POSIBLES USOS DE LOS PRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN. (THERMOSELECT, 2009)

2.2.3.4 Residuos de la gasificación.

Los residuos que se producen en la gasificación provienen principalmente de dos etapas, del gasificador y de la limpieza de gases. En la etapa del gasificador se producen cenizas y residuos carbonosos, mientras que en la limpieza de gases se producen partículas con altas concentraciones de metales pesados. En la Tabla 17 se puede ver más a detalle los residuos de la gasificación.

Proceso	Residuos	Volumen	Uso
Gasificador	Cenizas y residuos carbonosos	2 – 9 % del volumen de ingreso	Materia prima para la producción de cerámica estructural
Limpieza de gases	Partículas (alta concentración de metales pesados)	5 – 10 % del volumen de ingreso	Disposición final adecuada (confinamiento).

TABLA 17. RESIDUOS DE LA GASIFICACIÓN. (THERMOSELECT, 2009)

2.2.3.5 Ventajas de la gasificación.

La gasificación presenta algunas ventajas sobre otros tratamientos de residuos sólidos, por ejemplo, se pueden mencionar las siguientes:

La gasificación a altas temperaturas con oxígeno puro posibilita la fusión directa de los componentes minerales y metálicos de la basura, reduciendo aún más el volumen de residuos del proceso y por consiguiente su disposición final.

En los procesos a elevadas temperaturas, el gas de síntesis está exento de oxígeno y el enfriamiento es más rápido, elevando la eficiencia del proceso.

El gas de síntesis puede ser utilizado en la generación de energía eléctrica en motores de gas y en celdas de combustible con altos índices de eficiencia (Estrada, 2004).

Los compuestos obtenidos de la gasificación pueden ser empleados como materia prima para la industria química.

2.2.4 Descripción del tratamiento de Gasificación con arco de plasma.

La gasificación con arco de plasma es un proceso térmico a muy altas temperaturas, entre 5,000 y 15,000°C. El arco de plasma es aplicado a los residuos en un reactor de una forma completamente cerrada y controlada, en una atmósfera rica en agente ionizante. Este proceso se ilustra en la FIGURA 4.

El objetivo de este tratamiento es el de convertir el carbón y el hidrógeno contenido en los residuos en gas combustible compuesto de CO e H₂.

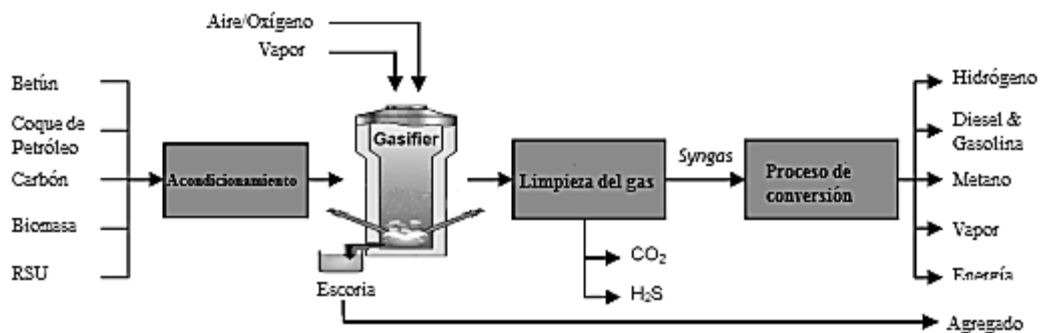


FIGURA 4. DIAGRAMA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN CON PLASMA. (WESTINGHOUSE PLASMA CORPORATION (WPC))

2.2.4.1 El arco de plasma.

Una antorcha de plasma es un equipo industrial que permite producir un gas ionizado, generalmente aire, a altísimas temperaturas mediante la generación controlada de un arco voltaico.

El plasma es el cuarto estado de la materia. Es un gas ionizado que existe en la naturaleza en los rayos o en las auroras boreales. La característica principal de un gas ionizado es facilitar una transferencia de calor en una pequeña cantidad de masa y generar temperaturas extremas de hasta 14.000 °C.

Existen dos grupos principales de plasmas, los plasmas de alta temperatura o plasmas de fusión, en el que todas las especies, es decir, electrones, iones y especies neutras, están en equilibrio termodinámico y los plasmas de baja temperatura o de descarga de gases. En los plasmas de baja temperatura, se puede hacer otra distinción, entre los plasmas térmicos en donde ocurre un cuasi-equilibrio y los plasmas fríos donde no hay equilibrio.

Entre los procesos de plasma, los plasmas térmicos son los más adecuados para el tratamiento de residuos, porque la materia orgánica, sometida a altas temperaturas, se descompone en los elementos que lo constituyen y los materiales inorgánicos son fundidos y convertidos en una escoria vitrificada densa que no se lixivia. Las antorchas utilizadas para estas aplicaciones pueden ser las antorchas de arco de plasma, alimentadas por corriente directa o las antorchas metálicas, donde el plasma es generado por una descarga de microondas (Tendero, Tixier, Tristant, Desmaison, & Leprince, 2006).

2.2.4.2 Descripción del proceso.

Una vez obtenido el plasma, que alcanza temperaturas de 5000 a 15000°C, el proceso de gasificación por la plasma, de forma general, consiste en inyectarle los residuos, el tiempo de residencia de éstos en él es muy bajo, 500 milisegundos para ser así atomizados y pasarlos posteriormente a una cámara de reacción donde se recombinan formando moléculas sencillas: CO, HCl. Las altas temperaturas del arco del plasma se aseguran de que las reacciones sean muy rápidas, y esto permite tiempos cortos de residencia, y por ello el incinerador de plasma se puede hacer más pequeño que otros con rendimiento de procesamiento comparable.

Después de enfriar la corriente con agua se filtra para eliminarle los sólidos y se introduce en una torre donde se eliminan los ácidos que contiene lavándola con producto cáustico antes de ser expulsados por la chimenea.

Una planta de gasificación por arco de plasma está compuesta por las siguientes etapas y zonas:

- Área de recepción y preparación de residuos o biomasa: en el caso de residuos, dependiendo de sus características físico-químicas, el contenido de metal y vidrio es reciclado y el material restante es secado y/o embalado. Opcionalmente, se puede incluir una línea dedicada exclusivamente a la recepción de residuos tóxicos o peligrosos, los cuales pueden ser enviados al reactor sin tratamiento previo para proteger a los trabajadores de cualquier posible riesgo.
- Área de gasificación: uno o más reactores con sus antorchas de plasma y sus correspondientes sistemas auxiliares.
- Sistema de tratamiento y limpieza del gas de síntesis.
- Área de producción de energía eléctrica: una turbina eléctrica en ciclo combinado (turbina de gas + turbina de vapor) produce la electricidad a partir del gas de síntesis de forma eficiente y rentable, con un rendimiento superior a cualquier incineradora u otro proceso de tratamiento térmico.

- Área de Auxiliares: donde se encuentran todos los equipos necesarios para el buen funcionamiento de la instalación: laboratorios, oficinas, unidad de producción de oxígeno, etc.

2.2.4.3 Tipos de gasificadores de arco de plasma.

Al ser ésta una tecnología relativamente nueva, no hay en la literatura una clasificación formal de los tipos de gasificadores. Sin embargo, las empresas que ofrecen esta tecnología tienen sus procesos y sus equipos con grandes similitudes. Algunas empresas que ofrecen este tratamiento son: Solena Group, Alter NRG Corp., Recovered Energy, Inc., Plasma Gasification Technologies, LLC., StarTech Environmental Corp., Phoenix Solutions Co. en EE.UU., Plasco Energy Group Inc. en Canadá.

2.2.4.4 Generación del gas de síntesis.

Se utilizan tres tipos de reacciones en la producción del Syngas:

La primera reacción es el cracking térmico; Todas las moléculas son disociadas hasta sus elementos primarios.

La segunda reacción es la oxidación parcial que favorece la formación del CO (Monóxido de carbono) y pequeñas cantidades de CO₂ (Dióxido de carbono) y H₂O (Agua). Estos dos últimos compuestos que normalmente son los productos de una oxidación total tienen un efecto negativo sobre el poder calorífico del Syngas por lo que es fundamental controlar la cantidad de oxígeno que entra en el gasificador para minimizar estas reacciones de oxidación. Por el contrario, las reacciones de oxidación parcial contribuyen a alcanzar los valores de energía necesarios para las reacciones de gasificación.

El tercer tipo de reacciones son las de re-formación. Estas reacciones permiten el acoplamiento en nuevas moléculas. Por ejemplo, la reacción entre el carbono y el agua produce monóxido de carbono e hidrógeno; el carbono reacciona con el dióxido de carbono produciendo monóxido de carbono. Estas reacciones contribuyen a la formación de un gas energético y a la reducción de la presencia de compuestos oxidados que disminuyan el poder calorífico del Syngas.

En general, la gasificación ocurre entre los 1700 °C (Temperatura máxima de salida del Syngas) y los 4000 °C (Zona de Plasma) (Rodríguez, 2008). Algunos reactores son llevados hasta temperaturas de 20,000 °C (Gomez, Amutha Rani, Cheeseman, Deegan, Wise, & Boccaccini, 2009). Este rango de temperaturas permite que las reacciones se lleven a cabo de forma muy rápida, minimizando el tamaño del gasificador. Permite además el uso de materiales que no tengan una resistencia térmica extremadamente alta, abaratando el precio de los materiales utilizados en el gasificador. Estas reacciones hacen posible que el reactor pueda operar a presión atmosférica, que es otro de los factores importantes para disminuir los costes de construcción del gasificador.

2.2.4.5 Tipos de residuos que pueden ser procesados.

Para este proceso generalmente se han usado biomasa, como por ejemplo madera triturada, residuos agrícolas, plásticos y neumáticos. Sin embargo, la experiencia práctica de gasificación de RSD es pequeña y aún se encuentra en plena etapa de investigación y estudios.

Algunos autores mencionan que la gasificación con arco de plasma puede procesar cualquier tipo de residuos, tales como: residuos sólidos urbanos, residuos biomédicos, residuos granulares de la fundición del aluminio, biomasa, residuos bituminosos, residuos de automóviles, plomo de suelos contaminados, lodos de plantas de tratamiento de agua, lodos de pintura, tambor de reacondicionamiento de los lodos, lodos orgánicos de la industria petroquímica, drogas ilícitas, residuos con alto contenido de metales, carbón y cenizas de incineración de RSU, residuos de fábricas de papel reciclado, balastros de luz fluorescentes, materiales que contengan asbesto, explosivos, neumáticos de goma y residuos industriales peligrosos, incluidos los PCB y concentrados insecticidas (Lahey, 2008).

2.2.4.6 *Productos del proceso de gasificación con arco de plasma.*

Hay tres productos fabricados por este proceso. El producto principal del proceso es un gas de síntesis producido cuando los elementos volátiles en el material de desecho se reducen a sus moléculas de base. Este gas se utiliza para generar electricidad mediante la alimentación de éste en el mismo tipo de motor de gas utilizados en la producción de electricidad a partir de gas natural (Rodríguez, 2008). Puede ser utilizado también para síntesis de productos químicos.

El segundo producto del proceso es el calor que se produce es utilizado para generar vapor. El vapor se recoge y se introduce en el proceso de generación de electricidad para mejorar su eficiencia.

El tercer y último producto del proceso es escoria vitrificada; sólidos reutilizables que se producen cuando los elementos no volátiles de los residuos son sometidos a temperaturas tan elevadas. Tan duro y limpio como el cristal, este sólido tiene una gran variedad de usos, tales como material de relleno para carreteras o un material para construcción. El sólido no reacciona con otros elementos y no genera lixiviados.

2.2.4.7 Ventajas del proceso.

Este proceso tiene ventajas sobre otros tratamientos, principalmente se pueden mencionar la ausencia de dioxinas, furanos, cenizas y escorias debido a la disociación molecular a tan altas temperaturas, pues a más de 5,000 °C, todas las moléculas orgánicas son desintegradas, solo permanece una mezcla de $H_2 + CO$ (Gomez, Amutha Rani, Cheeseman, Deegan, Wise, & Boccaccini, 2009). También es importante mencionar que este tratamiento puede tratar todo tipo de residuos sólidos y líquidos: RSU, industriales, tóxicos, neumáticos, etc., obteniendo como únicos subproductos sólidos la escoria vitrificada y una torta de azufre que pueden ser aprovechables.

Algunos proveedores de esta tecnología afirman poder lograr una producción neta de energía de 1400 – 2400 kWh/ton, la cual es entre 1,5 y 2,5 veces superior a las incineradoras de

última generación, logrando con esto que el 40% de la energía generada sean utilizados para el funcionamiento de la planta y el 60% sea vendida a la red eléctrica. Así mismo, indican que las emisiones gaseosas de las turbinas generadoras de la energía eléctrica son menores al límite establecido por la normativa europea (Westinghouse Plasma Corporation).

2.2.4.8 Desventajas del proceso

La mayor desventaja de este tratamiento es el que sus costos de inversión son muy elevados, debido a la instalación de las antorchas y del sistema de remoción de contaminantes del gas de síntesis obtenido (Gomez, Amutha Rani, Cheeseman, Deegan, Wise, & Boccaccini, 2009).

Igualmente, el alto consumo de energía eléctrica para la generación del arco de plasma y el alto consumo de agua para las unidades de enfriamiento requiere el proceso lo hacen aparentemente menos rentable económicamente.

2.2.4.9 Consideraciones para la selección de la tecnología

Para que sea viable un proyecto, éste debe de contar con un mínimo de dos líneas independientes. Esto permite continuar con el tratamiento de los residuos en casos de mantenimiento o emergencia.

A pesar de que la composición de los residuos de cualquier comunidad tiene variaciones durante el año y al paso del tiempo, el flujo de residuos debe procura ser continuo, con cierto porcentaje de variación permitido, para poder garantizar una eficiencia aceptable de eliminación de residuos y de generación de energía.

Es recomendable que el proveedor cuente con plantas en operación para poder comparar la información ofrecida con los resultados operativos de estas instalaciones.

Los residuos del tratamiento deben ser analizados para determinar su peligrosidad para su posterior disposición final en sitios apropiados. Estos datos son necesarios previa la aceptación del proyecto, pues influye dentro de los costos de operación de la planta.

Las instalaciones de la planta deben ubicarse en zonas con uso de suelo industrial, alejada de zonas habitacionales.

La chimenea debe tener el doble de la altura del edificio más alto, o un mínimo de setenta metros de altura.

El balance de energía eléctrica consumida contra la generada debe ser positivo para que el proyecto tenga un beneficio económico, de esta manera el consumo eléctrico de las instalaciones es cubierto por la misma y el excedente es vendido a la red nacional.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA.

3.1 Investigación bibliográfica.

Como primera aproximación al desarrollo de los indicadores a evaluar en este estudio, se identificaron una gran cantidad de variables tanto ambientales, económicas, sociales como técnicas que intervienen en los procesos de transformación térmica de incineración, gasificación convencional y gasificación con arco de plasma, por medio de una consulta en bibliografía especializada en el tema. De este modo se seleccionaron un total de cincuenta y ocho variables. En el anexo A se muestran las variables que fueron identificadas en cada categoría.

A partir de estas cincuenta y ocho variables, se seleccionan solamente veintidós variables por ser de mayor importancia en la selección y representatividad de las tecnologías para el tratamiento térmico de los residuos.

3.2 Desarrollo de los indicadores.

Una vez identificadas las principales variables que intervienen en los procesos de estos tratamientos, se procede al desarrollo de los indicadores. Estos indicadores se desarrollaron agrupando las variables previamente seleccionadas.

Los indicadores son modelos que permiten, a través de datos objetivos, el seguimiento y la transmisión de información sobre el comportamiento de la realidad y sobre su evolución y tendencias (Feria, 2003).

Los sistemas de indicadores ambientales son herramientas que no sólo contribuyen a ordenar la información con vistas al proceso de toma de decisiones políticas, sino que permiten sistematizar la evaluación ambiental facilitando la toma de decisiones.

Estos indicadores se enfocan en las características de instalación, operación y funcionamiento de los tratamientos de gasificación convencional y gasificación con arco de plasma. Al mismo tiempo, se clasifican los indicadores en Ambientales, Económicos, Sociales y Tecnológicos.

3.2.1 Indicadores Ambientales.

Para el caso del impacto ambiental, se desarrollaron dos indicadores de este tipo. El primero de ellos es la reducción de residuos sólidos urbanos, mientras que el segundo son las emisiones de CO₂ equivalente. La reducción de residuos sólidos indica el porcentaje de los residuos de la localidad que ya no tendrán como destino un sitio de disposición final, disminuyendo así el impacto ambiental que estos representan.

Este indicador está estrechamente relacionado con el nivel de la actividad económica de un país. También refleja las pautas de intensidad de uso de las materias primas y otros recursos naturales. Las variaciones en el tiempo podrían indicar cambios en los patrones de consumo

tanto en los procesos industriales como de la población en general y en la adopción de procesos de reciclado y reutilización.

Las emisiones de CO_{2eq} reflejan la emisión o reducción de gases de efecto invernadero que representa la operación de una planta del tipo en cuestión. Estas emisiones son datos de preocupación mundial que podrían significar al mismo tiempo un beneficio por entrar al mercado de los bonos de carbono.

3.2.2 Indicadores Económicos

Dos indicadores económicos se desarrollaron: *Costo de inversión*, el cual involucra los costos que representa la inversión inicial del proyecto por cada megawatt de potencia de la planta; *Costo de funcionamiento*, éste contempla todos aquellos costos involucrados en el funcionamiento de la planta por cada megawatt hora que sea producido en el proceso.

3.2.3 Indicador social.

Los indicadores sociales deben reflejar el impacto de la tecnología en la sociedad. Como indicador social se eligió el número de empleos generados para la operación de la planta. Este indicador se medirá como el número de empleos generados por cada gigawatt de energía eléctrica producido por el tratamiento.

3.2.4 Indicadores Técnicos.

En el ámbito técnico, se desarrolló como indicador la eficiencia energética del tratamiento. Esta eficiencia representada por la cantidad de energía generada con relación con la energía consumida por la misma. De igual manera, se consideran como datos de alta importancia la flexibilidad de la tecnología para aceptar un cierto grado de cambio en las características de los residuos de ingreso al tratamiento; igualmente, la flexibilidad para una futura ampliación de la planta debe ser considerada como un factor para la toma de decisión.

3.3 Evaluación de la tecnología.

Para evaluar la tecnología se utiliza cada uno de los indicadores desarrollados para realizar una estimación sobre la situación que representa el instalar y poner en marcha el tratamiento por evaluar.

Como valores de referencia se utilizan datos de un tratamiento de incineración de residuos sólidos con generación de energía eléctrica. Se emplean estos datos para comparar las tecnologías con otra que utiliza el mismo tipo de combustible, residuos sólidos; así mismo, los tratamientos de incineración han sido utilizados a nivel mundial por varios años, por lo que existen actualmente plantas de este tipo en operación.

3.4 Desarrollo de la herramienta.

La herramienta computacional se desarrolló en lenguaje Basic, mediante programación orientada a objetos utilizando el programa Visual Basic versión 6.0. Se realizó un análisis de entradas-salidas para poder crear la interfaz gráfica en la que se soliciten los datos necesarios al usuario y se muestren los resultados del proceso.

De esta manera, se crea una interfaz para que el usuario pueda ingresar los datos necesarios para realizar el cálculo de estos indicadores y obtener una evaluación o comparación entre las tecnologías de interés.

La herramienta se encarga de realizar los cálculos requeridos para cada uno de los indicadores y de graficar los resultados comparándolos directamente con los valores de referencia establecidos.

Igualmente, se pueden comparar hasta cinco tecnologías para poder determinar cuál de ellas es la que representa mayores beneficios para la localidad. Estos datos los representa la herramienta tanto gráfica como numéricamente.

Tanto los datos sobre la localidad como los valores de referencia pueden ser modificados dentro de la herramienta de acuerdo a las necesidades y actualizaciones de los usuarios de la misma. Esta flexibilidad de la herramienta facilita su uso y su actualización para futuras evaluaciones.

3.5 Caso de estudio

Para comprobar el desarrollo de la herramienta se lleva a cabo un caso de estudio. Este caso de estudio se debe realizar con datos proporcionados por empresas que ofrecen estos tratamientos y que también cuentan con plantas instaladas y en operación.

Los datos recabados deben ser actualizados y preferentemente comprobados en las plantas en operación.

La población para el caso de estudio debe contar con los datos necesarios sobre su gestión de residuos sólidos, así como los datos demográficos necesarios para el cálculo de los indicadores. Es recomendable que la localidad cuente con la mayor cantidad de información sobre sus residuos y el manejo de estos, como por ejemplo, datos sobre la composición de sus residuos, y los parámetros físicos de éstos.

Una vez realizados los cálculos para las tecnologías de interés, se realizará una comparación de los resultados para las tecnologías. Esta comparación es de utilidad para resaltar las diferencias en los resultados de cada una de las tecnologías en estudio.

CAPÍTULO 4

4. DESARROLLO.

A continuación se muestran los parámetros utilizados en este trabajo para el desarrollo del mismo. Se describen las variables que fueron empleadas para el desarrollo de los indicadores, así como los indicadores resultantes. De igual manera, se expone la forma en la que se llevó a cabo la realización de la herramienta, junto con los datos que se obtuvieron para el caso de estudio.

4.1 Identificación de variables en los tratamientos térmicos.

Una vez identificadas las variables que intervienen en los procesos de transformación térmica, se clasificaron las variables que intervienen en los procesos seleccionados en cuatro categorías: Ambiental, Económica, Social y Técnica. A continuación, en las tablas 18, 19, 20 y 21 se muestran las variables seleccionadas para desarrollar con ellas los indicadores.

Variables Ambientales	
1	Ahorro de combustibles fósiles
2	Emisiones al aire
3	Residuos del tratamiento

TABLA 18.VARIABLES AMBIENTALES (ELABORACIÓN PROPIA).

Variables Económicas	
4	Costo por consumo energético
5	Costo de pre - tratamiento
6	Costo de inversión
7	Costo de mantenimiento
8	Costo de operación
9	Costo de generación de energía
10	Costo por disposición de los residuos

TABLA 19.VARIABLES ECONÓMICAS (ELABORACIÓN PROPIA).

Variables Sociales	
11	Generación de nuevos empleos
12	Tasa de generación de residuos de la población.

TABLA 20.VARIABLES SOCIALES (ELABORACIÓN PROPIA).

Variables Técnicas	
13	Área requerida
14	Capacidad de tratamiento
15	Eficiencia del proceso
16	Flexibilidad al cambio de características de los residuos de ingreso
17	Generación de energía
18	Composición física de los residuos para el adecuado funcionamiento de la tecnología.
19	Parámetros fisicoquímicos de residuos que ingresan al proceso (humedad, peso volumétrico, poder calorífico)
20	Porcentaje de residuos aprovechables
21	Porcentaje de residuos transformados
22	Flexibilidad para posterior expansión

TABLA 21. VARIABLES TÉCNICAS (ELABORACIÓN PROPIA).

4.2 Desarrollo de los indicadores.

4.2.1 Indicadores Ambientales.

4.2.1.1 Reducción de residuos sólidos urbanos.

Este indicador muestra el porcentaje de residuos que se reducirán con la instalación de la planta, mientras mayor sea este indicador, mayores beneficios ambientales habrá, desde la contaminación del suelo, emisiones de metano al aire, hasta reducción de los costos de operación y mantenimiento de los sitios de disposición final de la localidad. Para lograrlo se relacionan las variables: residuos del tratamiento, tasa de generación de residuos sólidos de la población, junto con el tamaño de la población, capacidad de tratamiento, porcentaje de residuos aprovechables, y el porcentaje de residuos transformados.

Este análisis implica que mientras mayor sea el porcentaje de residuos transformados, mayores serán los beneficios a la comunidad. Pues la meta ideal sería la disposición final de cero residuos.

Con el conocimiento de estas variables, proporcionadas por el proveedor de la tecnología, se puede conocer el volumen de residuos que serán efectivamente dispuestos en rellenos sanitarios de la localidad y relacionarlo con el volumen total de residuos generados en la localidad.

$$RSU_{tot} = \tau_p * T_p$$

Dónde: RSU_{tot} = residuos sólidos urbanos generados por la población [ton / día].

τ_p = tasa de generación de residuos de la población [ton / día * hab].

T_p = tamaño de la población [hab].

En el análisis de este indicador se comienza por calcular los residuos sólidos urbano generados en la población. Este dato se puede estimar mediante la tasa de generación de residuos sólidos urbanos y el tamaño de la población, mediante la fórmula arriba expresada; o bien, mediante mediciones reales en estaciones de transferencia o directamente en sitios de disposición final.

Igualmente se debe estimar el volumen de los residuos aprovechados en el tratamiento, es decir, aquellos residuos que, al finalizar el proceso, no serán trasladados a sitios de disposición final, este cálculo se realiza como lo muestra la siguiente ecuación:

$$RSU_a = C.T. * [\rho + \varepsilon * (1 - \rho)]$$

Dónde: RSU_a = residuos sólidos aprovechables.

$C.T.$ = capacidad de tratamiento de la planta [ton/día].

ρ = porcentaje de residuos transformados.

ε = porcentaje de residuos aprovechables.

Esta ecuación es útil en el caso en el que el porcentaje de residuos aprovechados y el de residuos transformados sean dependientes, esto significa, que primero se lleva a cabo la separación de los residuos aprovechables y posteriormente la gasificación, eliminando cierto porcentaje de los residuos, o bien, que primero se realiza la gasificación de la cual se eliminan cierto porcentaje de residuos y de los que no fueron transformados se realiza la separación de los residuos que pueden ser aprovechables.

En el supuesto de que no sean dependientes, es decir, que del total de residuos tratados, cierto porcentaje sea eliminado y otro porcentaje sea aprovechable, se utiliza la siguiente ecuación:

$$RSU_a = C.T. * (\rho + \varepsilon)$$

Con este dato y los residuos totales generados en la población (RSU_{tot}), es posible calcular la reducción de residuos sólidos urbanos de la siguiente manera:

$$\text{Reducción de RSU} = \frac{RSU_a}{RSU_{tot}}$$

4.2.1.2 Emisiones de CO₂ equivalente.

Este indicador indica la cantidad de dióxido de carbono equivalente que representaría la instalación de la planta. Para ello se utilizan siete de las variables identificadas anteriormente: ahorro de combustibles fósiles, emisiones al aire de la planta, la energía generada por la planta, la capacidad de tratamiento, el porcentaje de residuos aprovechables, el porcentaje de residuos transformados, y la composición física de los residuos de la localidad.

Para realizar el cálculo se toman en cuenta tres aspectos importantes:

1. Las emisiones al aire de la misma,
2. El ahorro de emisiones que se tendrían al ahorrar los combustibles fósiles que serían utilizados en la generación de la energía que se generará con la nueva planta,

- Las emisiones de CO₂ por la disposición de RSU en rellenos sanitarios que se evitarían al tratar estos residuos.

Este indicador se calcula de la siguiente forma:

$$CO_{2eq} = \frac{\begin{matrix} \textit{emisiones} \\ \textit{de la planta} \end{matrix} \left[\frac{\text{ton CO}_{2eq}}{\text{año}} \right] + \begin{matrix} \textit{emisiones por} \\ \textit{combustibles fósiles} \end{matrix} \left[\frac{\text{ton CO}_{2eq}}{\text{año}} \right] + \begin{matrix} \textit{emisiones por} \\ \textit{disposición de RSU} \end{matrix} \left[\frac{\text{ton CO}_{2eq}}{\text{año}} \right]}{\begin{matrix} \textit{Capacidad de tratamiento} \\ \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] \end{matrix}}$$

Para el caso de las emisiones de CO_{2eq} de la planta se obtienen de los datos proporcionados por la empresa ofertante. En caso de que ésta no presente el cálculo en unidades de dióxido de carbono equivalente, se calculan mediante los datos de los gases emitidos por la planta y el Potencial de Calentamiento Global. De acuerdo al Second Assessment Report del IPCC (IPCC, 1995).

El Potencial de Calentamiento Global es un factor para tener una medida simple de los efectos radiactivos de la emisión de varios gases de efecto invernadero. En el caso del calentamiento global, estos efectos se traducen a el balance entre la radiación que entra en la atmósfera y la que sale de esta, así, si el balance es positivo, la superficie terrestre aumenta su temperatura, mientras que un balance negativo significa un enfriamiento de la misma. Este índice está definido como la vigencia radiactiva acumulada, es decir, su permanencia en la atmósfera,, entre el presente y un determinado horizonte de tiempo, producida por una unidad de masa de gas emitida hoy, expresada relativamente a alguna para un gas de referencia (CO₂ en este caso). Los valores de GWP se enlistan en el Anexo B.

En caso de no contar con las mediciones en toneladas de CO₂ equivalentes, se deben calcular aquellas que representa cada gas emanado utilizando la siguiente fórmula:

$$MtCO_{2e} = (Tg \text{ del Gas}) * (GWP)$$

Fuente: International Carbon Bank & Exchange.

Dónde: MtCO_{2e} = millones de toneladas de dióxido de carbono equivalentes. Tg del Gas = Peso del gas en Teragramos (1 Tg = 1x10⁶ ton). GWP = Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential).

Con los datos del proyecto se conocerán las emisiones o reducciones que el tratamiento presentará durante su operación, expresadas en tonCO_{2eq}. En el caso de las emisiones, éstas representarán un efecto negativo para la calidad del aire de la localidad, mientras que las reducciones representarían un beneficio tanto ambiental como económico para la localidad y para la empresa.

Para el cálculo de las emisiones que se ahorrarían por evitar la generación de energía con combustibles fósiles se considera la energía que se producirá con esta nueva tecnología, así se calcula la cantidad de combustibles fósiles que se emplearían para generar la misma cantidad

de energía. Así mismo se utiliza el factor de emisión proporcionado por la IPCC (Samudra, 2004).

El factor de emisión es la relación entre la cantidad de contaminante que se emite a la atmósfera debido a una cierta actividad. En este caso se utiliza el factor de emisión para el proceso de generación de energía eléctrica. Este factor indica, de acuerdo al tipo de combustible utilizado en la generación, la cantidad de toneladas de dióxido de carbono equivalente a las que equivaldrían las emisiones de este proceso.

Combustible	CO ₂ [kg/TJ]	CH ₄ [kg/TJ]	N ₂ O [kg/TJ]	Consumo (CFE, 2009)
Gas Natural	56,100.00	50.00	0.10	45.99 %
Combustóleo	77,367.00	3.00	0.30	27.21 %
Diesel	74,067.00	5.00	0.60	1.11 %
Carbón	64,600.00	0.70	1.60	19.57 %

TABLA 22. FACTORES DE EMISIÓN Y CONSUMO DE COMBUSTIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA. (ADAPTADA DE IPCC, 1997 Y CFE, 2009)

En la Tabla 22, se muestran los factores de emisión según la IPCC y el consumo de combustibles reportado por la CFE. Estos datos se utilizan en la herramienta para calcular, de una manera más cercana a la real, las emisiones equivalentes por el consumo de estos combustibles en la producción de energía. Así, se estima la cantidad de emisiones de CO_{2eq} que se emitirían al producir cierta cantidad de energía. Este cálculo se hace siguiendo los siguientes pasos:

1. Calcular la energía generada (E.G.) por la nueva tecnología en terajoules [TJ].
 - a. Si se proporciona en GW:

$$E.G. [TJ] = \left(\frac{\text{energía generada}}{[GW]} - \frac{\text{energía consumida}}{[GW]} \right) * \frac{\text{disponibilidad}}{\left[\frac{h}{\text{año}} \right]} * 3600 \left[\frac{s}{h} \right]$$

- b. Si se proporciona en GWh:

$$E.G. [TJ] = \left(\frac{\text{energía generada}}{[GWh]} - \frac{\text{energía consumida}}{[GWh]} \right) * 3600 \left[\frac{s}{h} \right]$$

2. Calcular las emisiones de CO_{2eq} por generación de energía basado en los factores de emisión, el consumo y el GWP (para este caso: GWP (CH₄)=21 y GWP (N₂O)=310).

$$\text{Emisiones de CO}_{2eq} = E.G. * \sum_n \left[\text{Consumo}_n * \sum_m (F.E_{n,m} * GWP_m) \right]$$

Dónde: n = tipo de combustible

Consumo_n = % de consumo del combustible

F.E._{n,m} = factor de emisión del contaminante m con el combustible n .

GWP_m = Potencial de Calentamiento Global del contaminante m .

Para nuestro caso, se considerará el consumo de combustible indicado por CFE para el país, en el porcentaje que ésta indica, tal como se muestra en la Tabla 23. De acuerdo a estos datos, se puede calcular las emisiones con la siguiente ecuación:

$$Emisiones\ de\ CO_{2\text{eq}} [tonCO_{2\text{eq}}] = E.G. [TJ] * 0.6095908$$

Combustible	Consumo de combustibles (CFE, 2009)
Gas Natural	45.990%
Combustóleo	27.210%
Diesel	1.110%
Carbón	19.570%

TABLA 23. CONSUMO DE COMBUSTIBLE PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA REPÚBLICA MEXICANA (CFE, 2009).

En el caso del ahorro de las emisiones por los residuos no dispuestos en rellenos sanitarios, existen varios métodos para su estimación. En este trabajo se emplea el método “Rendimiento teórico de gas” de la IPCC para el cálculo de las emisiones de metano en un relleno sanitario (IPCC, 1996). Este método requiere el cálculo de la siguiente ecuación:

$$Emisiones\ de\ \left[\frac{Gg}{año} \right]_{\text{metano}} = \left(RSU_T * RSU_F * FCM * COD * COD_F * F * \frac{16}{12} - R \right) * (1 - OX)$$

Dónde: RSU_T – Residuos sólidos urbanos totales generados en la localidad [Gg/año].

RSU_F – Porcentaje de RSU dispuestos en rellenos sanitarios [%].

FCM – Factor de corrección de metano.

COD – Carbono orgánico degradable [%].

COD_F – Porcentaje de DOC no asimilado [%].

F – Porcentaje de CH₄ en el relleno sanitario [%] (el valor por defecto es 50 %).

R – CH₄ recuperado [Gg/año].

OX – Factor de oxidación [%] (el valor por defecto es 0).

En nuestro caso, para el cálculo de RTU_T y RTU_F, no se utilizan datos de los RSU generados en la localidad. Para este cálculo se emplea la capacidad de tratamiento, es decir, la masa de residuos sólidos tratados de acuerdo a la capacidad de la planta. Para RSU_F se usa el porcentaje de residuos transformados junto con el porcentaje de residuos aprovechables, este

valor representa la masa de residuos que no será dispuesta y no generará emisiones al ambiente, para el cálculo se utiliza la siguiente ecuación.

$$RSU_F = \rho + \varepsilon (1 - \rho)$$

Dónde: ρ = porcentaje de residuos transformados.

ε = porcentaje de residuos aprovechables.

Para la determinación del FCM se contempla el manejo que se le da a los residuos sólidos urbanos. El método requiere que se ingresen datos o estimados de la cantidad de RSU que son dispuestos en cada una de las categorías de sitios de disposición final. Los posibles valores correspondientes de FCM se encuentran en la Tabla 24.

Tipo de sitio de disposición final	Factor de corrección de metano (FCM)
Sitio controlado	1.0
Sitio no controlado - profundo (>5m)	0.8
Sitio no controlado - superficial (<5m)	0.4
Sitio sin categorizar	0.6

TABLA 24. CLASIFICACIÓN DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL Y FACTORES DE CORRECCIÓN DE METANO. (IPCC, 1996)

El contenido de carbono orgánico degradable se basa en la composición de los residuos y se puede estimar por medio del promedio en peso del contenido de carbono de varios de sus componentes. De esta forma, conocida la composición de los residuos de la localidad se puede estimar este contenido.

Tipo de Residuo	Por ciento COD
Residuos de papel y textiles	40
Residuos de parques y jardines y otros residuos putrescibles (excepto comida)	17
Residuos de comida	15
Residuos de Madera y paja	30

TABLA 25. VALORES COMUNES PARA LOS PRINCIPALES TIPO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS. (BINGEMER, CRUTZEN, 1987)

Utilizando los valores de la Tabla 25 se puede estimar el contenido de carbono orgánico de los residuos dispuestos en un relleno sanitario de acuerdo a su composición. Así, para el cálculo de éste contenido se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido COD} = 0.40 (A) + 0.17 (B) + 0.15 (C) + .030 (D)$$

Dónde: A = fracción de RSU de papel y textiles.

B = fracción de RSU de residuos de parques y jardines y otros residuos putrescibles (excepto comida).

C = fracción de RSU de alimentos.

D = fracción de RSU de madera y paja.

La fracción de carbono orgánico degradable (COD_F) es la porción de COD que se convierte en gas del relleno sanitario. Ésta estima cuanto carbono no puede ser asimilado. Estas estimaciones se pueden realizar mediante un modelo teórico que depende solamente de la temperatura en la zona anaerobia del relleno sanitario: $0.014T + 0.28$, donde T es la temperatura (Tabasaran, 1981). Suponiendo una temperatura constante en la zona anaerobia de 35°C, independiente de la temperatura ambiente (Bingemer y Crutzen, 1987), el COD_F resulta de 0.77.

El contenido de metano en el gas del relleno sanitario (F) se considera del 50%, siendo el otro 50% dióxido de carbono. Esta relación puede ser cambiada manualmente en la herramienta.

El metano recuperado (R) es la cantidad de CH_4 que se captura para su uso o su quema.

El factor de oxidación (OX) representa el CH_4 que se oxida en las capas superiores de la masa de residuos y en el material de cubierta, debido a la presencia de oxígeno. Actualmente no existe un valor aceptado internacionalmente para este factor, por lo que se la recomendación es la de utilizar 0.

Una vez obtenido el contenido de metano del gas del relleno sanitario se puede estimar la cantidad de dióxido de carbono del mismo. De acuerdo al contenido de metano en el gas (F), se considera que el resto del gas es CO_2 , pudiendo así estimar las emisiones de CO_{2eq} de los RSU que no fueron dispuestos.

Teniendo así la siguiente ecuación para conocer las emisiones de gas de los residuos que serían dispuestos en un relleno sanitario.

$$\text{Emisiones de de RS} = \text{Emisiones de } CH_4 \text{ de RS} + \text{Emisiones de } CO_2 \text{ de RS}$$

Con el cálculo de las emisiones de metano, se puede plantear la siguiente ecuación para el cálculo de las emisiones de CO_{2eq} :

$$\text{Emisiones de } CO_{2eq} \text{ de RS [ton } CO_{2eq}] = \frac{\text{Emisiones de } CH_4 \text{ de RS}}{F} * \{1 + F * [GWP(CH_4) - 1]\}$$

4.2.2 Indicadores Económicos

4.2.2.1 Costo de inversión.

El primer indicador, *Costo de inversión*, se calcula mediante la suma de los costos involucrados en la instalación de la planta. En este indicador se relacionan las variables: costos del terreno, de la maquinaria, mano de obra, equipo, instalaciones, etc., así como la capacidad de generación de la planta.

$$\text{Costo de Generación} \left[\frac{\$}{MW} \right] = \frac{\text{Costo de inversión}}{\text{Potencia de la planta [MW]}}$$

Estos datos deben ser proporcionados por la empresa que presenta el proyecto. El costo de inversión considera principalmente dos elementos: el costo directo y el costo indirecto. El Costo directo es obtenido de dividir todas las erogaciones correspondientes a la obra entre la capacidad de la planta. Refleja el valor del terreno, los materiales, equipos, mano de obra, etc., incorporados a la planta.

De los costos originados por estudios previos, administración del proyecto, ingeniería, control y otras actividades relacionadas con la obra se obtiene el Costo indirecto.

Este indicador abarca los todos los costos que deben ser erogados para poder poner en marcha la planta de tratamiento, incluyendo los costos de equipos y maquinaria auxiliar requerida para su funcionamiento.

Estos costos reflejan el costo en el presente que se requiere para el arranque de la planta, es por esto que se debe dividir entre la potencia que está proyectada para ser proporcionada en el proceso, expresada en MW.

4.2.2.2 Costo de funcionamiento.

El segundo indicador, *Costo de funcionamiento*, incluye costos de procesos o necesidades para la generación de energía durante el tiempo de vida de la planta, desde los costos de operación y mantenimiento, como los necesarios para operar el pre-tratamiento, el tratamiento de gases y los equipos auxiliares como podrían ser unidades criogénicas para la producción de oxígeno, cambios o refacciones de piezas o equipos, etc. Para esto se relacionaron las variables: costo del pre-tratamiento, costo de disposición de los residuos, y nuevamente la energía generada por la planta.

$$\text{Costo de funcionamiento} \left[\frac{\$}{MWh} \right] = \frac{\text{Costos de operación y mantenimiento}}{\text{Energía Generada [MWh]}}$$

Dónde:

$$\begin{aligned} \text{Costos de operación y mantenimiento} \left[\frac{\$}{\text{año}} \right] &= \text{Costo de combustible} + \text{Costo de operación} + \text{Costo de mtto} + \text{Costo por consumo energético} \\ &+ \text{Costo del pre - tratamiento} + \text{Costo del tratamiento de gases} + \text{Costo de disposición de residuos} + \text{Otros Costos} \end{aligned}$$

Los costos de combustible se refieren al pago por la obtención de la materia prima para la generación de la energía eléctrica. En el caso de estas tecnologías, esta materia prima son los residuos sólidos urbanos, los cuales no son comprados por parte del generador de la energía, sino que representan un ingreso por la disposición de los residuos en el tratamiento, o bien, un ahorro por la no disposición de los residuos en otro sitio de disposición final. Es por esta razón que este costo se verá afectado por un signo negativo en caso de ser un ingreso.

Los costos de operación y mantenimiento consideran dos componentes, uno fijo y otro variable. Los fijos están presentes independientemente de la operación de la planta y por lo

tanto no se hallan directamente relacionados con la energía generada. Este renglón incluye los siguientes conceptos de costos:

- Salarios
- Prestaciones
- Seguro Social
- Servicios de Terceros
- Gastos Generales
- Materiales (excepto del área de operación)

Los costos variables son aquellos que guardan una relación directa con la generación de energía eléctrica. Principalmente se consideran los materiales empleados en el área de operación.

El costo por consumo energético se refiere al costo de la energía que debe ser suministrada a la planta para que ésta opere. Este costo sólo está presente en los casos en los que la planta no genera suficiente energía como para autoabastecerse, requiriendo de energía externa para completar sus necesidades eléctricas.

Los costos de disposición se refieren a aquellos generados en caso de ser necesaria una disposición final de los residuos del tratamiento. Dependiendo de los procesos dentro de la planta, se pueden producir residuos sólidos que requieran de una disposición, inclusive podrían requerir de una disposición especial dada su peligrosidad.

Estos costos representan el costo por año de operar y darle el mantenimiento al tratamiento, por esta razón, se divide entre la cantidad de energía eléctrica que se producirá en el transcurso de un año.

4.2.3 Indicador Social.

4.2.3.1 Generación de nuevos empleos.

El indicador social de presión elegido es la creación de nuevos empleos. Este indicador es principalmente cuantitativo, y su efecto se verá reflejado al pasar los años, con la variación de la tasa de crecimiento de la población y por consiguiente del número de habitantes de la localidad. Para ello, se relacionaron dos variables antes mencionadas: generación de nuevos empleos y la energía eléctrica generada por la planta.

Estos tres indicadores, (nuevos empleos, tamaño de la población y tasa de crecimiento poblacional) indican a un mediano plazo cómo es que la sociedad está recibiendo la nueva tecnología y todas sus afectaciones al medio. Así, se tiene la comparación directa del número de nuevos empleos que creará la instalación de la planta, como una forma de selección de la tecnología más adecuada para la localidad.

Al estar enfocado este trabajo en la elección de una nueva tecnología, no es recomendable estimar el crecimiento o el tamaño de la población a un futuro, pues estos valores dependen

directamente del desempeño cotidiano de la planta. Por esta razón, el indicador que se tomará en cuenta para la evaluación será el número de nuevos empleos generados por la planta.

Para realizar una posible comparación entre tecnologías de distintas capacidades, este indicador se expresará como la relación de empleos generados entre la energía eléctrica generada por la planta, es decir, *empleos generados / capacidad instalada*.

4.2.4 Indicador Técnico.

4.2.4.1 Eficiencia energética.

El indicador técnico es la eficiencia energética de la planta. Esta se estima mediante la relación de la energía producida por la planta entre la energía que le es suministrada para su funcionamiento. Para ello se relacionan las variables: eficiencia del proceso, tasa de generación de residuos de la población, composición física de los residuos de ingreso, parámetros fisicoquímicos de los residuos que ingresan al proceso,

La energía que le es suministrada para su operación proviene de dos fuentes. La primera es la energía proporcionada por los residuos que son ingresados en el gasificador, es decir, se alimentan los residuos sólidos urbanos con cierto poder calorífico para generar energía dentro del gasificador. La segunda fuente de energía es aquella que alimenta de energía eléctrica a la planta. Dado el proceso de la gasificación, se considera que parte de la energía que produce la planta se utiliza para su autoabastecimiento, por lo se puede despreciar este término de la ecuación.

Esta energía se puede calcular de la siguiente manera:

$$E_{RSU} = \frac{\text{flujo de ingreso de RSU}}{\text{de RSU}} * \frac{\text{poder calorífico de los residuos}}{\text{de los residuos}} * \frac{\text{disponibilidad de la planta}}{\text{de la planta}}$$

Donde E_{RSU} es la energía que se suministra al proceso por concepto de los residuos sólidos urbanos que se ingresan como combustible al gasificador.

El flujo de ingreso de RSU es la cantidad de residuos que son suministrados al proceso como materia prima. Las unidades de este flujo deben ser [kg/día].

El poder calorífico de los residuos se puede obtener de estudios de laboratorio directamente o bien, puede ser estimado dada la composición de los residuos de la localidad. Ambas formas pueden ser utilizadas en la herramienta. En el caso de la estimación por la composición, se utilizan los datos teóricos de poder calorífico según la fracción de residuo sólido, como se muestran en la Tabla 26 (una lista más completa se muestra en el Anexo C).

$$PC = \sum_i n_i PC_i$$

Dónde: PC = poder calorífico total de los RSU ingresados

n_i = porcentaje en peso de la fracción de RSU

PC_i = poder calorífico de la fracción de RSU

Tipo de Residuo	Contenido Energético (kcal/kg)
Residuos de comida mezclados	998
Grasas	8964
Papel mezclado	3777
Papel periódico	4431
Cartón	3912
Cartón encerado	6292
Plásticos mezclados	7834
Textiles	4422
Goma	6050
Cuero	4167
Residuos de jardín	1445
Madera mezclada	3689
Vidrio	47
Latas de hojalata	167
Metales	-

TABLA 26. CONTENIDO ENERGÉTICO TÍPICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS. (TCHOBANOGLIOUS & THEISEN, 1996)

$$\eta = \frac{\text{Energía producida}}{\text{Energía suministrada}} = \frac{E_{neta}}{E_{RSU}}$$

La eficiencia energética de la planta se puede estimar con la ecuación anterior. La energía producida por la planta es información que debe ser proporcionada por el fabricante de la misma. Es importante recordar que la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de la planta será producida por ella misma, por lo que ésta ya se encuentra considerada en el cálculo. Es por ello que el valor que se debe ingresar en el cálculo es la energía neta, es decir, la diferencia entre la energía total producida y la energía consumida por la planta.

4.2.4.2 Flexibilidad.

Propiamente no se trata de un indicador porque no cumple con la característica de ser medible y cuantificable, sin embargo, considera dos aspectos muy importantes para la toma de decisiones que deben ser contemplados: *la flexibilidad al cambio de las características de los residuos de ingreso y la flexibilidad para posterior expansión*. Este criterio sólo reflejará mediante una afirmación o una negación si el proyecto cumple con cada uno de estos tipos de flexibilidad.

4.3 Evaluación de la tecnología.

A continuación, en la Tabla 27, se muestran los indicadores que se desarrollaron, así como una breve descripción y unidades.

Indicador	Descripción	Unidades
Reducción de residuos sólidos urbanos.	Porcentaje de residuos que se reducirán con la instalación de la planta	[%]
Emisiones de CO ₂ equivalente.	Dióxido de carbono equivalente que representaría la instalación de la planta	[tonCO ₂ eq]
Costo de inversión.	Costo inicial para la instalación de la planta por unidad de potencia.	[\$USD/MWh]
Costo de funcionamiento.	Costos de cada MWh necesario para el funcionamiento de la planta.	[\$USD/MWh]
Generación de nuevos empleos.	Empleos generados por la planta por cada GWh	[empleos/GWh]
Eficiencia energética.	Capacidad de la planta de convertir los RSU en energía eléctrica	[%]

TABLA 27. DESCRIPCIÓN Y UNIDADES DE LOS INDICADORES DESARROLLADOS (ELABORACIÓN PROPIA).

En cuanto a la flexibilidad, como se mencionó anteriormente, es solamente una variable verbal no cuantificable que indica si el proyecto presenta la posibilidad de cambios, tanto de las características de los residuos como de una posterior expansión de la misma.

4.3.1 Valores de referencia.

La evaluación de las tecnologías debe hacerse comparando directamente cada uno de los indicadores con los valores de referencia de cada uno, los cuales se muestran en la Tabla 28. Para realizar la comparación de los indicadores se eligió el tratamiento de incineración de residuos sólidos municipales con generación de energía eléctrica. Este tratamiento se seleccionó para tener una comparación más real entre procesos que utilicen el mismo combustible – residuos sólidos – y el mismo resultado – energía eléctrica –. Otra razón por la cual fue seleccionado es la experiencia internacional que se tiene con este tipo de tratamiento, esta tecnología se ha utilizado en países como Estados Unidos, Japón, China y algunos países de la Unión Europea. En la República Mexicana se cuenta con una planta de incineración, sin embargo, esta sólo trata residuos peligrosos. En este caso se tomó como referencia un incinerador con capacidad de 200,000 toneladas al año, es decir, 660 toneladas por día.

Indicador	Valor de referencia	Comentario
Reducción de residuos sólidos urbanos.	$\frac{660 \text{ ton}}{RSU \text{ localidad}} \%$	El valor ideal de la gestión integral de RSU es la disposición cero, es decir, no utilizar sitios de disposición final.
Emisiones de CO ₂ equivalente.	0.7 a 1.2 $\left[\frac{\text{tonCO}_{2\text{eq}}}{\text{ton}} \right]$	Emisiones de dióxido de carbono equivalentes de una planta de incineración de RSU. (IPCC, 2001).
Costo de inversión.	\$6,000 a \$12,000 [miles \$USD/MW]	Costos de inversión de una planta de incineración de RSU con recuperación de energía (Banco Mundial, 1999).
Costo de funcionamiento.	\$133.00 a \$266.66 [\$USD/MWh]	Costos de funcionamiento totales para una planta de incineración de RSU con capacidad de 660 toneladas por día (Banco Mundial, 1999).
Generación de nuevos empleos.	1.34 [empleos/GWh]	Relación al 2009 de empleos por energía bruta generada en la industria eléctrica (INEGI, 2010 y CFE, 2009)
Eficiencia energética.	14 al 30 % 0.3 a 0.6 [MWh/ton]	Eficiencia de generación de energía eléctrica de una planta de incineración de RSU. (IPCC, 2001).

TABLA 28. VALORES DE REFERENCIA PARA CADA UNO DE LOS INDICADORES (ELABORACIÓN PROPIA).

4.4 Desarrollo de la herramienta.

Con esta selección de los indicadores, se continuó con la programación de la herramienta computacional, creando así una interfaz para que el usuario pueda ingresar los datos requeridos para realizar el cálculo de dichos indicadores y obtener una evaluación o comparación entre las tecnologías de interés.

4.4.1 Datos de entrada.

La herramienta requiere los datos técnicos, económicos, sociales y ambientales tanto de la localidad como de las tecnologías a evaluar. Con estos datos, la herramienta realiza el cálculo de los indicadores y muestra los resultados de la evaluación de la tecnología capturada.

La información requerida por la herramienta se divide en dos grupos: información sobre la localidad y la información proporcionada por el proveedor de la tecnología a evaluar, con esta información se calculan los indicadores considerando la instalación y operación de la planta de tratamiento en cuestión. Las variables solicitadas son las mostradas en las Tabla 29 y Tabla 30:

Información sobre la localidad
CH ₄ recuperado de los RS de la localidad
Porcentaje de CH ₄ en los RS de la localidad (opcional)
Tasa de generación de residuos sólidos urbanos per cápita
Número de habitantes de la localidad
Tipo de RS en la localidad
Composición física de los residuos de la localidad
Parámetros fisicoquímicos de los residuos
Porcentaje de residuos dispuestos en RS
Residuos generados
Costo de disposición de residuos del tratamiento

TABLA 29. INFORMACIÓN SOBRE LA LOCALIDAD REQUERIDA POR LA HERRAMIENTA (ELABORACIÓN PROPIA).

Información sobre el proyecto
Emisiones de CO _{2eq} de las instalaciones
Energía eléctrica consumida por la planta
Energía eléctrica generada por la planta
Disponibilidad (factor de planta)
Capacidad de tratamiento de la planta
Porcentaje de residuos aprovechables
Porcentaje de residuos transformados
Costo de inversión
Costo de operación
Costo de mantenimiento
Costo por consumo energético
Costo del pre-tratamiento
Costo del tratamiento de gases
Cuota por el tratamiento de los residuos
Número de nuevos empleos creados

TABLA 30. INFORMACIÓN SOBRE LA TECNOLOGÍA REQUERIDA POR LA HERRAMIENTA (ELABORACIÓN PROPIA).

4.4.2 Captura de los nuevos proyectos.

Para comenzar la evaluación de un nuevo proyecto se deben ingresar los datos fundamentales del proyecto:

- Tiempo de vida útil.
- Año de inicio de operación.
- Nombre del proyecto.
- Tipo de tratamiento.
- Descripción breve del proyecto.
- Empresa responsable del proyecto.

- Entidad federativa y municipio en donde se instalará.

En la FIGURA 5 se muestran la interfaz para ingresar dichos datos.

Una vez capturados estos datos, se ingresan los datos ambientales, técnicos, económicos y sociales presentados en el proyecto de la planta de tratamiento. En esta captura de datos se puede optar por proyectos que incluyan una futura expansión, para efectos de cálculos más apegados a la situación proyectada. Esto se muestra en la FIGURA 6

The image shows a software window titled "Nuevo Proyecto" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). The window contains the following fields and controls:

- Número de proyecto:** A text input field containing the number "7".
- Tiempo de vida útil:** A text input field followed by the label "[años]".
- Año de Inicio:** A text input field.
- Nombre del proyecto:** A large text input field.
- Tipo de Tratamiento:** A text input field.
- Descripción del proyecto:** A large text input field.
- Empresa:** A text input field.
- Entidad Federativa:** A dropdown menu.
- Municipio:** A dropdown menu.
- Buttons:** Two buttons at the bottom: "Guardar" (Save) and "Cancelar" (Cancel).

FIGURA 5. CAPTURA DE UN NUEVO PROYECTO Y ESTRATÉGIAS POLÍTICAS.

Datos del Proyecto

Datos del Proyecto

Número de Proyecto: Año de Inicio: Empresa:

Nombre del Proyecto: Entidad Federativa:

Tipo de Tratamiento: Municipio:

Descripción del proyecto:

Información del proyecto:

Tiempo de vida útil: [años]

Disponibilidad: h/año

Emissiones de CO2: [tonCO2eq/año]

Capacidad de tratamiento: [ton/día] Costo de inversión: [USD]

Porcentaje de residuos aprovechables: [%] D Costo de operación: [USD/año]

Porcentaje de residuos eliminados: [%] Costo de mantenimiento: [USD/año]

Nuevos empleos creados: [empleos] Costo del pretratamiento: [USD/año]

Consumo energético: [MWh/año] Costo del post-tratamiento: [USD/año]

Energía eléctrica generada: [MWh/año] Costo por consumo energético: [USD/año]

Flexibilidad para una futura expansión. Costo por disposición de residuos del tratamiento: [USD/ton]

Flexibilidad para el cambio de las características de los residuos de ingreso. Cuota del tratamiento: [USD/ton]

Las emisiones de CO2 equivalente deben calcularse por los gases emitidos.

Volumen de emisiones al aire: m3/h

Gases emitidos:	GWP	Emisiones
<input type="text" value="0"/>	GWP	<input type="text" value="0"/> mg/m3
<input type="text" value="0"/>	GWP	<input type="text" value="0"/> mg/m3
<input type="text" value="0"/>	GWP	<input type="text" value="0"/> mg/m3
<input type="text" value="0"/>	GWP	<input type="text" value="0"/> mg/m3
<input type="text" value="0"/>	GWP	<input type="text" value="0"/> mg/m3
<input type="text" value="0"/>	GWP	<input type="text" value="0"/> mg/m3

Emisiones de CO2:

FIGURA 6. CAPTURA DE DATOS DEL PROYECTO.

En el caso específico de las emisiones de CO_{2eq}, se pueden ingresar las estimaciones de otros gases emitidos por la planta, para así calcular el equivalente en toneladas de CO₂ por medio de la tabla de GWP del Anexo B.

Con estos datos capturados, la herramienta se encarga de realizar los cálculos necesarios para hacer una evaluación de la tecnología propuesta de acuerdo a los indicadores desarrollados. Las FIGURAS 7 y 8 muestran estos resultados para cada una de las tecnologías elegidas.

4.5 Caso de estudio.

La localidad seleccionada para el estudio fue la Ciudad de México. La tasa de generación, así como la composición de los residuos de la ciudad y la gran cantidad de información disponible sobre la gestión de los residuos sólidos fueron los motivos para la selección de la misma como nuestro caso de estudio.

Se recabaron los datos necesarios para la utilización de la herramienta, tanto de la localidad, en este caso la Ciudad de México, como de la tecnología seleccionada: gasificación convencional. Con estos datos se realizaron evaluaciones con la herramienta, con la intención de ejemplificar diversos escenarios de tecnologías en esta localidad.

4.5.1 Localidad para el caso de estudio.

Como se mencionó anteriormente, la localidad seleccionada para el caso de estudio es la Ciudad de México. A continuación, en las Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33 se enlistan las características necesarias para los cálculos de los indicadores.

Información sobre la localidad	Ciudad de México	Unidades
CH ₄ recuperado de los RS de la localidad	0	[ton]
Porcentaje de CH ₄ en los RS de la localidad (opcional)	50	[%]
Tasa de generación de residuos sólidos urbanos per cápita	1.48	[kg/día*hab]
Número de habitantes de la localidad	8,846,752.00	[hab]
Tipo de RS en la localidad	Controlado	
Porcentaje de residuos dispuestos en RS	100	[%]
Residuos generados	13,093,192.96	[kg/día]
Costo de disposición de residuos del tratamiento	260.00	[\$/ton]

TABLA 31. INFORMACIÓN NECESARIA SOBRE LA LOCALIDAD (ELABORACIÓN PROPIA).

Origen	Bordo Poniente
Humedad (% en peso)	32.84
Cenizas (% en peso)	29.22
Materia volátil (% en peso)	32.15
Carbón fijo (% en peso)	5.60
Azufre (% en peso)	0.098
PCS (kcal/kg)	2,400.45
PCI (kcal/kg)	2,185.34

TABLA 32. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LOS RESIDUOS DISPUESTOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO. SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS. DIRECCIÓN TÉCNICA. 2008).

Subproductos		Total		Subproductos		Total
1	Abatelenguas	0.027%	19	Papel periódico	4.966%	
2	Algodón	1.314%	20	Papel sanitario	5.935%	
3	Cartón	6.692%	21	Pañal desechable	1.636%	
4	Cuero	0.109%	22	Placas radiológicas	0.004%	
5	Envase de cartón	1.921%	23	Plástico de película	4.558%	
6	Fibra dura vegetal	0.688%	24	Plástico rígido	3.502%	
7	Fibra sintética	0.856%	25	Poliuretano	0.164%	
8	Gasa	0.054%	26	Poliestireno expandido	0.582%	
9	Hueso	0.270%	27	Residuo alimenticio	37.780%	
10	Hule	0.367%	28	Residuo de jardinería	3.208%	
11	Jeringa desechable	0.038%	29	Toallas sanitarias	0.037%	
12	Lata	1.245%	30	Trapo	1.229%	
13	Loza y cerámica	0.299%	31	Vendas	0.005%	
14	Madera	1.236%	32	Vidrio de color	2.644%	
15	Material de construcción	1.848%	33	VIDRIO transparente	4.646%	
16	Material ferroso	2.564%	34	Residuo fino	1.707%	
17	Material no ferroso	0.482%	35	Otros	2.996%	
18	Papel bond	4.392%	TOTAL		100 %	

TABLA 33. COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RSU DE LA CIUDAD DE MÉXICO (SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS. DIRECCIÓN TÉCNICA. 2008).

La tecnología de Gasificación convencional tiene una gran cantidad de modalidades y variaciones como las mencionadas previamente en el capítulo 2 de este trabajo. Para el caso de este trabajo, basados en la disponibilidad de datos, se seleccionaron dos tratamientos

disponibles en el mercado de proveedores reconocidos a nivel mundial, Thermoselect (Japón/Corea), y Plasco Energy Group (Canadá).

4.5.2 Proyecto Thermoselect.

Thermoselect es una empresa fundada en Japón y Corea. La tecnología Thermoselect radica en obtener un gas de síntesis, materias minerales vitrificadas útiles, así como metal rico en hierro y azufre sometiendo los desechos domésticos e industriales así como la basura especial a un proceso ininterrumpido de reciclaje que consiste en gasificar a altas temperaturas los componentes residuales orgánicos y sometiendo a fusión directa los inorgánicos. Con el tratamiento del agua de proceso se obtiene agua depurada además de sal y concentrado de cinc como subproductos. En contraste con otros procedimientos térmicos no hace falta depositar o aplicar tratamiento ulterior a cenizas, escoria o polvo de filtración.

Thermoselect transforma los residuos de todo tipo en: Gas de síntesis para una gran variedad de usos y materias primas minerales y metálicas principalmente.

La tecnología de Thermoselect es un proceso de ciclo cerrado basado en una gasificación a alta temperatura con un tiempo de residencia extendido para los gases del proceso.

Esta tecnología simultáneamente gasifica materia orgánica y funde materiales inertes. No hay necesidad de realizar una separación o una reducción de tamaño de los RSU antes de del proceso, es decir, no se requiere de un pre-tratamiento. En su lugar, se ingresan los RSU mezclados al proceso y éstos son transformados ya sea en energía o en sub-productos aprovechables.

La tecnología Thermoselect no genera residuos que requieran de disposición final, bajo el supuesto de que todos los sub-productos tengan un mercado, lo cual está reportado de esta manera en las experiencias de plantas en Japón.

El proceso de Thermoselect comienza con la alimentación de los residuos al proceso sin necesidad de un pre-tratamiento. Inmediatamente entran en un proceso de secado en una cámara en ausencia de oxígeno y con calentamiento indirecto. El producto desecado se ingresa en un reactor de alta temperatura, donde se funde a altas temperaturas en presencia de oxígeno como agente gasificador, formando un gas. Este gas pasa a través de un proceso de lavado de gases y es transformado en un gas de síntesis.

Actualmente la tecnología Thermoselect se encuentra en operación comercial en siete localidades en Japón (Chiba, Matsu, Kurashiki, Nagasaki, Yorii, Tukushima e Izumi). La planta de Chiba es la más antigua, la cual opera desde 1999.

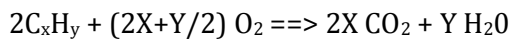
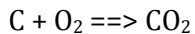
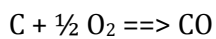
Los materiales que no son transformados en energía en el proceso de gasificación son recuperados como sub-productos. Aproximadamente el 7.5% de la masa de ingreso es transformada en áridos o agregados para la construcción y metales mezclados, provenientes de la fundición de la materia inorgánica en el gasificador. El árido para la construcción es base silicio y contiene impurezas inertes. Los metales incluyen hierro, aluminio y cobre, dependiendo mayormente en la composición de los RSU de la localidad. Otros sub-productos

son sales industriales (como cloruro de sodio, fluoruro de sodio principalmente), azufre e hidróxido de zinc, los cuales son generados durante el proceso de limpieza de gases.

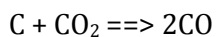
4.5.2.1 Descripción del proceso.

En la entrada del sistema, los residuos son conducidos sin tratamiento previo hasta una prensa que los compacta, distribuye sus residuos líquidos, en caso de existirlos, y les extrae el aire restante para eliminar así el exceso de nitrógeno.

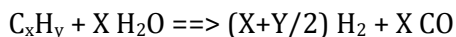
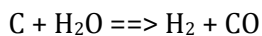
Al aumentar las temperaturas se deshidratan los residuos, los componentes orgánicos se transforman y son transportados al interior de un reactor de altas temperaturas. El carbono y los compuestos carbonados obtenidos por desgasificación se gasifican en la atmósfera saturada de vapor de agua a temperaturas de hasta 2000° C, inyectando oxígeno. Las siguientes reacciones exotérmicas provocan la aparición de monóxido y dióxido de carbono.



Simultáneamente tiene lugar la reacción endotérmica de Boudouard:



Así como las reacciones agua-gas, también endotérmicas, como por ejemplo:



Con tiempos de permanencia de al menos 2 segundos y con el gas a temperaturas superiores a 1200° C, se destruyen con los hidrocarburos clorurados, las dioxinas y los furanos, lo mismo que otros compuestos orgánicos. Los principales componentes del gas de síntesis resultante son moléculas más pequeñas (H₂, CO, CO₂, H₂O). A continuación, el enfriamiento ultrarrápido con agua, de 1200° C a menos de 90° C, impide que vuelvan a formarse hidrocarburos clorurados. El gas de síntesis es sometido a una limpieza de varias fases durante la cual se absorben o condensan los contaminantes. Hecho esto queda disponible el gas de síntesis, ya purificado, como portador de energía o como materia prima, por ejemplo para la síntesis de sustancias químicas básicas como el metanol.

Los constituyentes inorgánicos metálicos y minerales se funden en el reactor a temperaturas de hasta 2000° C. La masa fundida es homogeneizada en un canal anexo al reactor de altas temperaturas. A estas temperaturas se producen dos fases estables de alta temperatura: agregado mineral (utilizado como árido para la construcción) y metales. La masa fundida ya homogénea se somete a un enfriamiento ultrarrápido con agua, separándose los metales y agregados minerales, los cuales son extraídos en forma de granulado del estanque de agua que excluye el gas. Los granulados minerales y metálicos se clasifican en el exterior del sistema mediante separación magnética. La calidad de los agregados minerales vítreos equivale a la de los productos naturales. Los metales son aptos para la industria metalúrgica.

El agua proveniente de la humedad de los residuos y de las reacciones de gasificación se aprovecha en el proceso interno como agua refrigerante. La sal, el concentrado de zinc y el azufre son reutilizables en la industria. Todos los productos intermedios generados durante las fases de limpieza se devuelven al proceso térmico de transformación de materias. (Thermoselect, 2010).

En el Anexo D se puede observar el diagrama de este proceso. Y en la Tabla 34 se muestran sus características.

Información sobre el proyecto - Thermoselect		
Emisiones de CO ₂ eq de las instalaciones	0.18099	[tonCO ₂ eq/MWh]
Energía eléctrica consumida por la planta	16.608	[MW]
Energía eléctrica generada por la planta	61.796	[MW]
Disponibilidad (factor de planta)	7,498.56	[h/año]
Capacidad de tratamiento de la planta	1037	[ton/día]
Porcentaje de residuos aprovechables	100	[%]
Porcentaje de residuos transformados	100	[%]
Costo de inversión	262.91	[millones \$USD]
Costo de operación	25,920,022.4	[\$USD/año]
Costo de mantenimiento		
Costo por consumo energético	incluido en operación y mtto	
Costo del pre-tratamiento	incluido en inversión	
Costo del tratamiento de gases	incluido en inversión	
Número de nuevos empleos creados	42	[empleos]
Fuente: Interstate Waste Technologies, Inc. 2008		

TABLA 34. DATOS TÉCNICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES DE THERMOSELECT (THERMOSELECT, 2009).

4.5.3 Proyecto Plasco Energy Group.

Plasco Energy Group es una empresa canadiense dedicada a la construcción y operación de instalaciones que funcionan con tecnología propia para convertir residuos sólidos municipales en energía limpia y otros subproductos. Plasco emplea un proceso patentado que recicla eficientemente el calor del proceso de gasificación de residuos y utiliza características únicas para refinar los productos gaseosos en un gas de síntesis limpio.

4.5.3.1 Descripción del proceso.

El proceso Plasco puede aceptar residuos mezclados, tanto sólidos como líquidos, previa una separación de materiales reciclables. Este proceso requiere de una preparación de los residuos, la cual se compone de una separación y una trituración para reducir el tamaño de los RSU. En esta etapa se separan principalmente metales.

Posterior a la separación y preparación de los residuos, éstos son ingresados al reactor donde se lleva a cabo la gasificación. Para garantizar y controlar la calidad del gas de síntesis, Plasco tiene la opción de alimentar junto con el flujo de residuos de ingreso, un flujo suplementario de residuos llamado Flujo de Carbono Consistente (CCF por sus siglas en inglés). El CCF es un

flujo de residuos con un poder calorífico conocido y preestablecido (por ejemplo, llantas o plástico no reciclable).

El gas de síntesis resultante es limpiado y posteriormente quemado en motores a gas Jenbacher para la generación de energía eléctrica. Otra parte de la energía eléctrica generada en el proceso es obtenida por la recuperación del calor del proceso en generadores a vapor o calderas acopladas a turbinas de vapor.

Los residuos principales de este proceso son escoria, que representa el 17% de la masa de los residuos ingresados, la cual puede ser utilizada como áridos para la construcción, así como pequeñas cantidades de sales y azufre. Los residuos que requieren de disposición final equivalen aproximadamente al 1% de la masa de residuos procesada.

En el Anexo D se puede observar el diagrama de este proceso. Y en la Tabla 35 se muestran sus características.

Información sobre el proyecto - Plasco Energy Group		
Emisiones de CO ₂ eq de las instalaciones	0.35	[tonCO ₂ eq/MWh]
Energía eléctrica consumida por la planta	5.575606721	MW
Energía eléctrica generada por la planta	16.72682016	MW
Disponibilidad (factor de planta)	8,035.00	[h/año]
Capacidad de tratamiento de la planta	400	[ton/día]
Porcentaje de residuos aprovechables	100	[%]
Porcentaje de residuos transformados	98	[%]
Costo de inversión	100.80	[millones \$USD]
Costo de operación	9,225,900.00	[\$USD/año]
Costo de mantenimiento		
Costo por consumo energético	incluido en operación y mtto	
Costo del pre-tratamiento	incluido en inversión	
Costo del tratamiento de gases	incluido en inversión	
Número de nuevos empleos creados	50	[empleos]

TABLA 35. DATOS TÉCNICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES DE PLASCO ENERGY GROUP (PLASCO ENERGY GROUP, 2010).

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al emplear la herramienta bajo los parámetros definidos previamente en el capítulo anterior. Los resultados se obtuvieron mediante el uso de la herramienta, ingresando los datos de cada uno de los proyectos anteriormente descritos, junto con los datos de la localidad en estudio, en este caso la Ciudad de México.

5.1 Aplicación de la herramienta

Los datos ingresados se utilizaron para realizar las estimaciones sobre los indicadores desarrollados en este trabajo, mostrando a continuación los resultados que supondría la instalación de cada uno de estos tratamientos en la Ciudad de México.

5.1.1 Resultados para la tecnología Thermoselect.

5.1.1.1 Indicador ambiental – Reducción de residuos sólidos urbanos.

De acuerdo a los datos publicados por la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal la cantidad de residuos sólidos urbanos que son generados por la población y que en la misma cantidad son dispuestos en el Relleno Sanitario Bordo Poniente tienen un valor de 13,093.19 [ton/día].

De acuerdo a los datos de la tecnología elegida, ésta tiene la capacidad de tratar 1037 toneladas de residuos diariamente.

La herramienta obtiene el resultado de este indicador mediante el cálculo de los residuos dispuestos en los rellenos sanitarios de la localidad, a partir de los datos de la tasa de generación de residuos sólidos en la población. Esto en el caso en el que no todos los residuos sean dispuestos de esta manera.

Así, se puede observar en la FIGURA 7 que la utilización de esta tecnología significaría una reducción del 7.506% de los residuos de la Ciudad de México. Esto se podría utilizar para poder estimar la cantidad de plantas de estas mismas características que serían necesarias para tratar todos los residuos de la localidad. En este caso se requerirían 12.63, es decir, 13 plantas de este tipo para tratar los residuos de la ciudad. Este dato es más significativo si se toma en cuenta que es recomendable diversificar los tipos de tratamiento para tener una mejor gestión.

5.1.1.2 Indicador ambiental – Emisiones de CO_{2eq}.

Con los datos proporcionados por el fabricante y los obtenidos de reportes e investigaciones sobre los residuos de la ciudad, se puede ingresar a la herramienta la información necesaria para que realice el cálculo de este indicador. Los datos utilizados son las 83,865 toneladas de dióxido de carbono equivalentes emitidas al año por la planta de tratamiento; los 463,381 megawatts por hora que genera la planta, así como los 124,536 que consume.

Con estos datos la herramienta genera el cálculo, y como se observa en la FIGURA 7, esta tecnología permitiría la reducción de un poco más de tres toneladas de CO₂ equivalentes por cada tonelada de residuos que sea tratada en la planta.

5.1.1.3 Indicador social – Nuevos empleos generados.

Como se puede apreciar en la FIGURA 7, el costo de inversión de esta tecnología es de cerca de seis millones de dólares por cada megawatt de potencia instalada en la planta. Este costo es menor al costo de inversión que representaría la instalación del tratamiento de incineración de los residuos.

5.1.1.4 Indicador social – Nuevos empleos generados.

El indicador social, nuevos empleos creados, se estima a través de los datos proporcionados por la empresa proponente. Este dato debe ser ingresado a la herramienta como el total de empleos previstos durante todo el tiempo de vida útil del proyecto.

En la Tabla 36 se muestra la estimación de nuevos empleos que genera este proyecto seleccionado para este caso de estudio por cada gigawatt de energía eléctrica generada en la planta. Así, se tiene el valor de 0.124 empleos por cada gigawatt hora producido en la planta, valor menor al reportado en los valores de referencia.

Año	Energía generada [GWh]	Nuevos empleos	Empleos / GWh
2012	338.845	42.00	
Total:	338.845	42	0.124

TABLA 36. EMPLEOS CREADOS DURANTE LA OPERACIÓN DE THERMOSELECT (ELABORACIÓN PROPIA).

5.1.1.5 Indicador técnico – Eficiencia energética

Este indicador es muy importante técnicamente, pues indica la relación entre la energía útil y la energía suministrada, es decir, muestra si la planta se desempeña de una forma correcta o tal vez alguna tecnología pueda generar una mayor cantidad de energía con la misma cantidad de recursos, los cuales en nuestro caso son los residuos sólidos urbanos.

La eficiencia puede ser expresada de muy diversas formas, en este trabajo se utilizarán dos formas: la relación entre la energía que produce la planta y la energía capaz de otorgar los residuos de acuerdo a su composición física. Esta forma de medir la eficiencia indica la capacidad del proceso de extraer la mayor cantidad de energía de los residuos sólidos ingresados.

La otra forma de expresar la eficiencia es la relación entre la energía producida y la cantidad de residuos que ingresaron para lograrlo. Esta relación es la forma más rápida de conocer el comportamiento de la planta, pues sólo se debe conocer su capacidad de tratamiento y la energía que produce. Esta forma de expresar este indicador es utilizada internacionalmente tanto en esta como en otras tecnologías para la producción de energía.

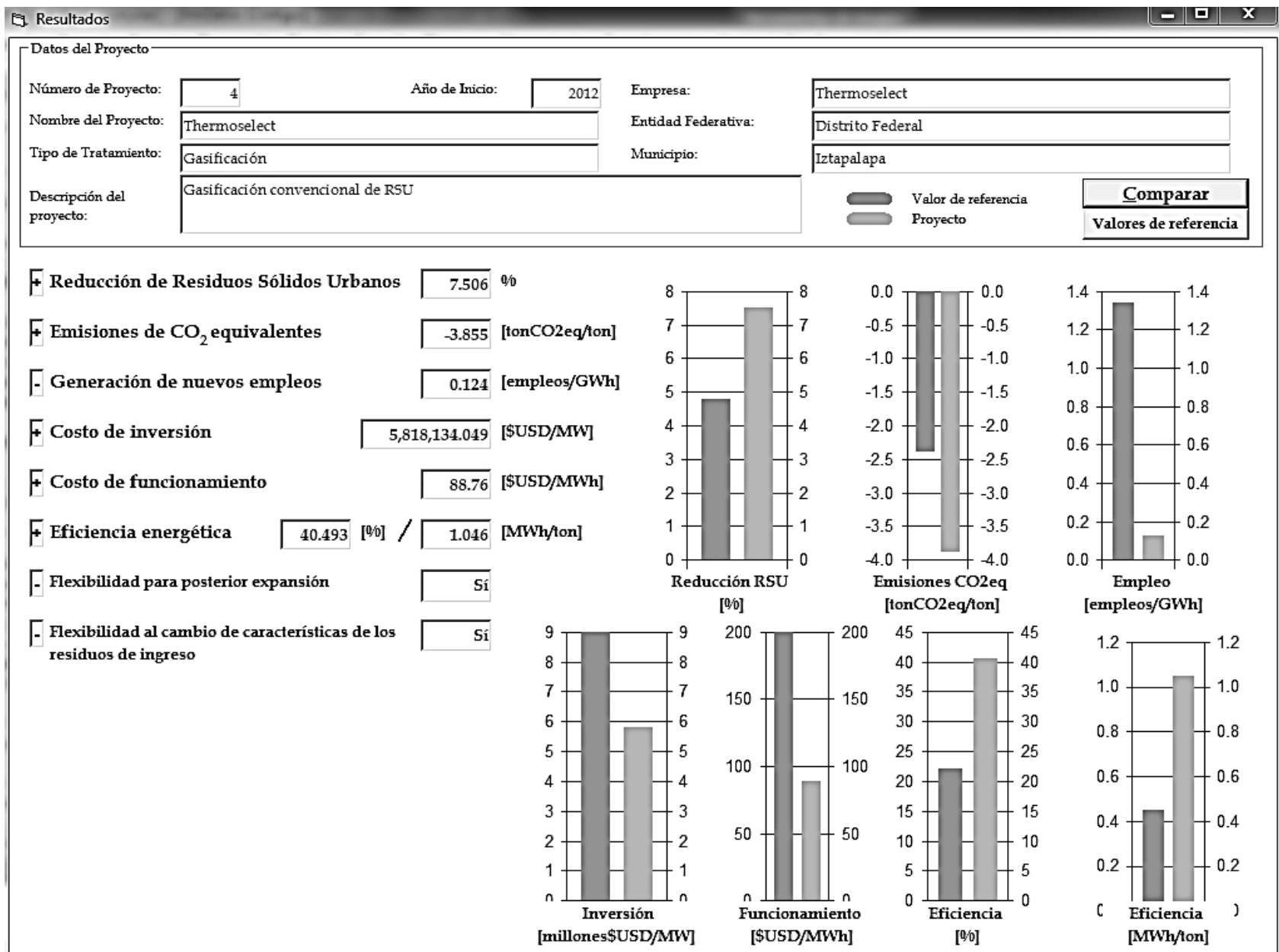


FIGURA 7. RESULTADOS DE LA PLANTA THERMOSELECT.

Primeramente, se debe conocer el poder calorífico del combustible que se va a utilizar para la generación, en este caso, los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México. La estimación de este parámetro se muestra en el Anexo C. Este cálculo se realizó con los datos de los residuos sólidos como son recolectados. Se puede observar que el poder calorífico calculado es de 2123.93 [kcal/kg], muy cercano al encontrado en reportes gubernamentales que es de 2185.34 [kcal/kg].

Con el dato del poder calorífico de los residuos que ingresarán al sistema, la disponibilidad de planta de 85.6% y el flujo de residuos de 324,000 [ton/año], el resultado de la energía que pueden entregar los residuos que serán ingresados es de 684,616 MWh, lo que indica que, de acuerdo a la FIGURA 7, se tiene una eficiencia del 40.493 %, o bien, de 1.046 megawatt hora por cada tonelada, que son mayores a los que puede generar una planta de incineración de RSU.

5.1.2 Resultados para la tecnología Plasco Energy Group.

5.1.2.1 Indicador ambiental – Reducción de residuos sólidos urbanos.

La planta propuesta por esta empresa es más pequeña que la anterior, es de 400 toneladas diarias. Con esta cantidad de residuos sólidos y cómo se puede notar en la FIGURA 8, se lograría una reducción de 2.895% de los residuos de la ciudad. Realizando el mismo ejercicio que con la tecnología anterior, es posible estimar que se requieren 32.73, es decir, 33 plantas con estas características para tratar todos los residuos de la Ciudad de México.

5.1.2.2 Indicador ambiental – Emisiones de CO_{2eq}.

La herramienta ya cuenta con los valores de los potenciales de calentamiento global (GWP) y con los factores de emisión, así como con los factores de corrección de metano, dependiendo del tipo de sitio de disposición final del que se trate al igual que con los factores para el cálculo del contenido de carbono orgánico degradable en los residuos.

Este fabricante indica que sus instalaciones emiten 0.35 toneladas de CO₂ equivalente por cada megawatt que produce, lo que equivale a 47,040 toneladas de CO₂ equivalentes al año. Igualmente ofrece la capacidad de producir 134,400 MWh con un consumo de 44,803.16 megawatts.

Con estos datos y los necesarios de la población, la herramienta indica que esta tecnología reduciría cerca de tres toneladas de CO₂ equivalentes por cada tonelada de residuos tratada. Este resultado se muestra en la FIGURA 8.

5.1.2.3 Indicadores económicos – Costo de inversión y Costo de funcionamiento.

Debido a la escasez de datos completos por parte de los proveedores de la tecnología, estos indicadores no pudieron ser representados fielmente en este caso de estudio. Sin embargo, dichos indicadores son de bastante utilidad, pues la mayoría de las decisiones políticas son tomadas con gran base en los argumentos económicos, por lo que el pasar por alto esta categoría sería un grave error.

Como se mencionó, para esta tecnología, los datos de los costos no fueron proporcionados por el fabricante, por lo que se estimaron de acuerdo a datos de artículos de investigación. De esta manera, se eligieron valores de plantas con características muy parecidas a las de la elegida en este caso de estudio.

Los costos de inversión, como se muestra en la FIGURA 8, resulta de nueve millones dólares por megawatt de capacidad de la planta.

Los costos de funcionamiento representan un total de ciento un dólares por cada megawatt hora que produzca la planta. Este valor es cerca de la mitad del costo de operación de una planta de incineración de residuos.

5.1.2.4 Indicador social – Nuevos empleos generados.

En la Tabla 37 se muestra la estimación de nuevos empleos que genera este proyecto seleccionado para este caso de estudio por cada gigawatt de energía eléctrica generada en la planta. Se puede notar que es un valor de 0.558 empleos por gigawatt, el cual es mayor a la tecnología de Thermoselect, pero menor que la referencia.

Año	Energía generada [GWh]	Nuevos empleos	Empleos / GWh
2012	89.597	50.00	
Total:	89.597	50.00	0.558

TABLA 37. EMPLEOS CREADOS DURANTE LA OPERACIÓN DE PLASCO ENERGY GROUP (ELABORACIÓN PROPIA).

5.1.2.5 Indicador técnico – Eficiencia energética

Para este cálculo de la eficiencia de esta planta, la energía de los residuos es de 303,211 megawatts hora. Esta es menor debido a que esta planta tiene un menor flujo de residuos de ingreso. Con la energía de 89,596.84 megawatts hora que promete el fabricante se obtiene una eficiencia del 24.175%, o bien, 0.669 megawatt hora por cada tonelada tratada, como lo muestra la FIGURA 8.

5.1.3 Comparación de los proyectos.

Se debe observar la diferencia entre las dos propuestas. En el caso de la primera propuesta, se observa que tiene un buen porcentaje de reducción de los residuos de la ciudad. Este proyecto tiene una de las mayores capacidades de tratamiento de las plantas de gasificación, sin embargo, a pesar de el gran volumen de residuos dispuestos en la Ciudad de México, ésta planta tratará cerca del diez por ciento de ellos. Junto con la implementación de otras tecnologías y sistemas de separación y reciclaje de RSU, este tratamiento puede formar parte de la gestión integral de residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México.

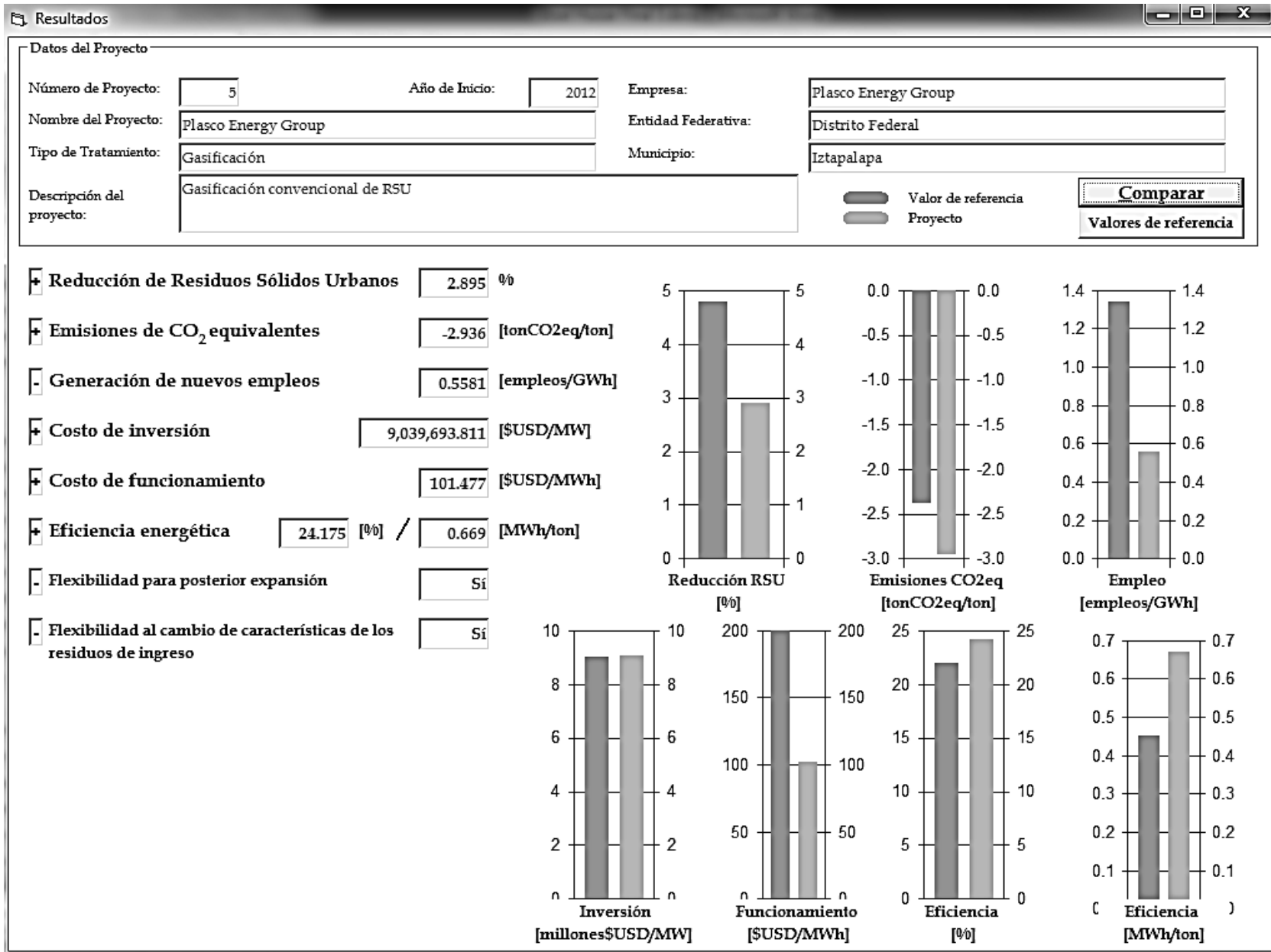


FIGURA 8. RESULTADOS DE LA PLANTA PLASCO ENERGY GROUP.

Otro punto a resaltar es que su eficiencia es un valor aceptable, mayor a la de una planta de incineración, igualmente, al comparar los datos de megawatt hora por energía suministrada, se puede notar que algunas plantas de incineración, tienen una eficiencia menor (hasta del 30 %), lo que significa que pueden generar más energía que un incinerador con la misma cantidad de combustible. Otra ventaja de la gasificación radica en que el combustible no es de provecho para alguna otra actividad, además de que se puede mejorar esta eficiencia haciendo una separación previa e ingresando una mayor cantidad de residuos con un poder calorífico alto. Sin embargo, esta alternativa afecta las posibilidades de reciclaje de los RSU, pues los residuos de mayor poder calorífico son algunos de los que son más fácilmente comercializables.

Sobre la tecnología de Plasco, se puede mencionar que supera a la tecnología de Thermoselect en el ámbito social, pues genera una cantidad mayor de empleos. Sin embargo, tiene una baja eficiencia, apenas del treinta por ciento. Sus costos de inversión y de funcionamiento son más altos, pues bien, como en la mayoría de los casos, a mayor escala los costos disminuyen. Si se analizan únicamente los resultados de la tecnología Plasco se puede notar que es una mejor opción que la incineración, sin embargo, el contar con otras opciones para la toma de decisión permite la selección de una tecnología más apropiada.

Bajo estos resultados, se puede deducir que la opción más viable para la Ciudad de México es la planta ofrecida por la empresa Thermoselect. Sin embargo, estos resultados pueden variar si se presentan estrategias políticas distintas. Por ejemplo, si en la localidad se le da mayor importancia a los beneficios sociales, la mejor opción sería el proyecto de Plasco Energy Group, pues es el que mayor ventaja presenta en esta categoría. Por ello la importancia de tener estrategias socio-políticas bien definidas al momento de analizar los resultados de la evaluación.

La herramienta también cuenta con un módulo para comparar hasta cinco distintas tecnologías que presenten propuestas en la misma localidad. Este módulo compara los datos obtenidos por el cálculo de los indicadores tanto de los proyectos propuestos como de los valores de referencia para la localidad y los grafica para una visualización más sencilla de las diferencias entre los proyectos.

Para nuestro caso de estudio, se compararon los dos proyectos propuestos, Thermoselect y Plasco Energy Group, obteniendo los resultados y gráficas mostrados en la FIGURA 9.

Con esta comparación se puede confirmar que la tecnología más apropiada es la ofrecida por Thermoselect, la cual presenta características más adecuadas para las condiciones de la Ciudad de México que la de Plasco Energy Group.

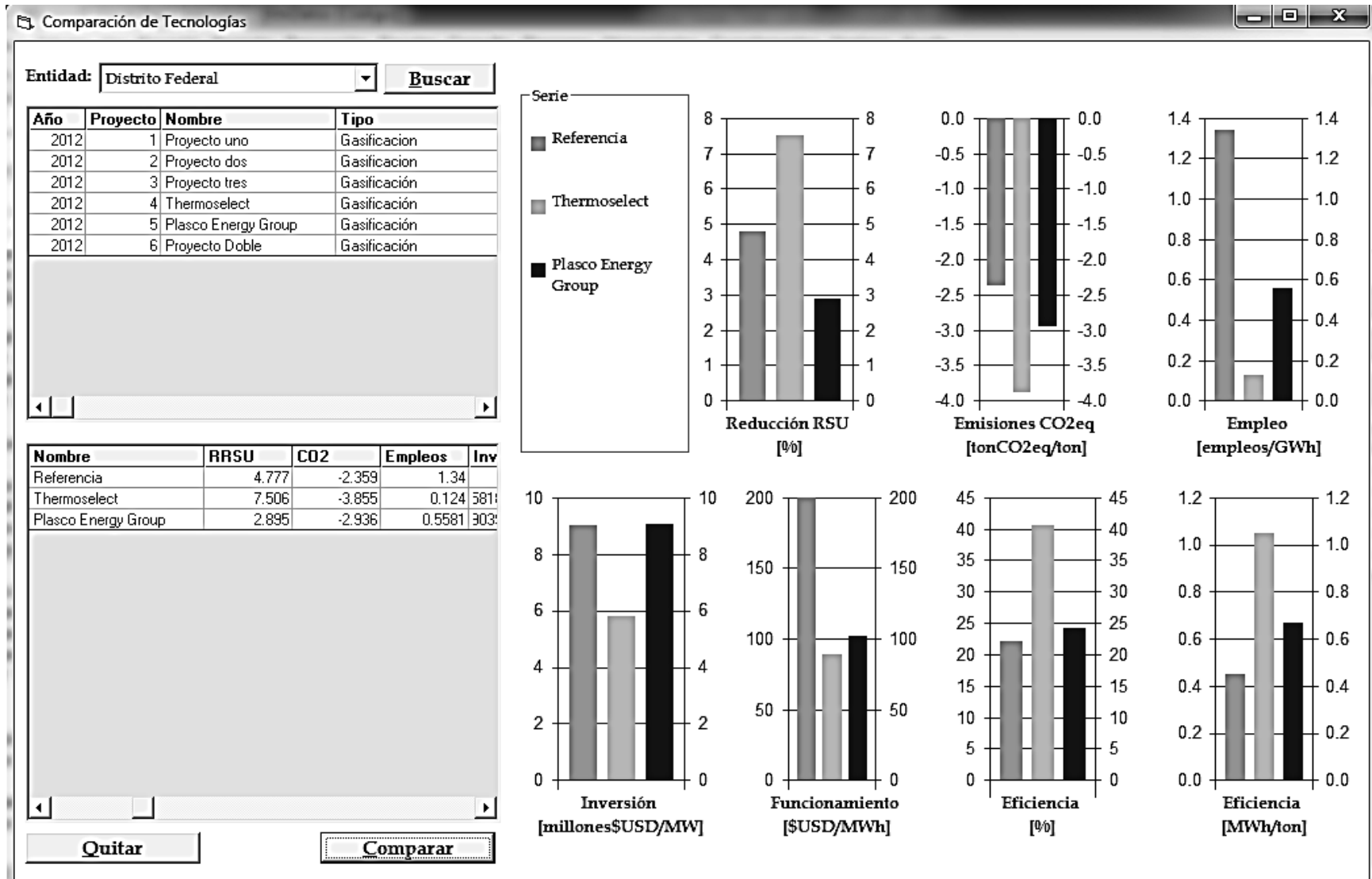


FIGURA 9. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS PROYECTOS SELECCIONADOS Y LOS VALORES DE REFERENCIA.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 Conclusiones.

Este trabajo se enfocó principalmente en el impacto de las nuevas tecnologías – específicamente tratamientos térmicos de gasificación – sobre el medio ambiente, la economía y la sociedad. Este tipo de tratamientos puede ser una alternativa para la reducción del volumen y aprovechamiento de energía de los residuos sólidos urbanos en las localidades, ayudando en la disminución de la disposición final de éstos.

Se identificaron adecuadamente las variables involucradas en el proceso de transformación de los residuos y se definieron los criterios de selección para obtener una serie de criterios que reflejan los aspectos más importantes de la implementación y funcionamiento de la tecnología y su relación tanto con el medio ambiente como con la comunidad. Esto permite enfocarnos en las variables más importantes y no desperdiciar recursos en el resto de las variables que no brindan información tan importante.

El uso de indicadores se utilizó para mostrar una serie de datos que por su complejidad o cantidad pueden ser difíciles de interpretar. Por otro lado, su utilización permite una comparación entre la situación de diferentes países así como la estandarización de la información emitida para cualquier fin internacional. Además, muestran objetivamente el estado y la dinámica ambiental de cierta área, dejando ver claramente la verdadera situación y dirección de las políticas vigentes.

Los indicadores elegidos se eligieron por su claridad en la comprensión y su representatividad sobre las características de la tecnología, que en este caso son los tratamientos térmicos. La sencillez de estos indicadores facilita el acceso y la comprensión de la información a los usuarios potenciales.

Al utilizar herramientas informáticas junto con indicadores complejos, se puede facilitar el acceso, la disposición y la utilización de datos para convertirlos en información relevante a usuarios, auxiliándolos en la formulación de planes y políticas en la materia.

Esta herramienta no pretende describir a detalle la gestión –en su etapa de tratamiento– de residuos sólidos urbanos en cada municipio del país, más bien, el uso de los indicadores se orienta hacia la identificación y seguimiento de un número reducido de variables relevantes que permitan describir un perfil de la situación de esta etapa de la gestión de residuos sólidos en cada municipio, específicamente a este tipo de tratamientos.

Los usuarios a los que está dirigida la herramienta son los prestadores de servicios, principalmente los organismos de financiamiento, gobiernos estatales, municipales, instituciones federales, y cualquier otra autoridad involucrada en la gestión integral de los RSU.

En este trabajo se desarrollaron indicadores para la evaluación de tratamientos térmicos. El indicador, las emisiones de CO₂ equivalente, es una buena medida para la concientización de la contaminación de aire. Este indicador es utilizado internacionalmente para conocer la situación de la calidad del aire de la localidad. Además, se realizan inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero, en los que participan tanto el sector gubernamental como el privado. Este indicador también es utilizado en el cálculo de los bonos de carbono, medida tomada para promover la reducción de los GEI en el mundo mediante una recompensa económica a quienes lo hagan. Es por esto que este indicador es importante dentro de las consideraciones a realizar en la selección de tecnologías para el tratamiento de los residuos, más aún si se trata de tratamientos térmicos que podrían presentar emisiones a la atmósfera o bien reducir las emisiones de GEI por concepto de emisiones de metano en sitios de disposición final.

La creación de nuevos empleos es un indicador usado internacionalmente para determinar el nivel de la calidad de vida. En el caso de nuestro interés, sería de utilidad para tener información de estos temas, además de la aceptación social del tratamiento al analizarlo junto con el crecimiento poblacional. Pues el hecho de que aumente la tasa de crecimiento poblacional y la generación de empleos, se podría estimar indirectamente que la tecnología es bien vista por la población y tiene aceptación.

El indicador reducción de residuos sólidos urbanos dispuestos se utiliza para conocer el destino final que se le da a los RSU. Internacionalmente hay una tendencia a la reducción del número de sitios controlados (y prohibición de sitios no controlados) para el confinamiento de residuos sólidos. Una de las principales razones es la gran superficie que debe ser destinada para este tipo de obras; siendo de gran preocupación en varios países la falta de espacio. Otras razones son los altos costos ambientales que deben pagarse por este tipo de disposición, como la contaminación e inutilización del suelo, los gases y los lixiviados que se producen al reaccionar los residuos, los cuales contaminan el aire y el agua respectivamente. Esta tendencia a la reducción de este tipo de destino final tiene como uno de sus medios la eliminación de residuos, también conocida como residuos-cero; esta eliminación puede ser por varios métodos, y en el caso del enfoque de este trabajo es por medio de tratamientos térmicos.

La consideración de la eficiencia energética es muy útil para determinar la conveniencia de la selección de un tipo de tratamiento. Para lograr mayores eficiencias en este tipo de tratamientos se sugiere una separación previa de los residuos con menor poder calorífico. Esto tiene dos beneficios, el primero es el hecho de que los materiales con bajo poder calorífico son reciclables o reutilizables, por lo que su recuperación aumentaría los beneficios tanto económicos como técnicos del tratamiento. El otro beneficio radica en el aumento del poder calorífico de la masa de residuos de ingreso, lo que aumentaría directamente la eficiencia energética del proceso y por lo tanto disminuir el costo.

Se puede observar que, para el caso de estudio, las tecnologías de gasificación son más apropiadas que las de incineración, de acuerdo a los indicadores desarrollados en este trabajo.

Los indicadores ambientales, económicos y técnicos permiten concluir que estos tratamientos presentan mayores beneficios que los de incineración.

Particularmente, el proyecto Thermoselect es más conveniente para la Ciudad de México. Los indicadores ambientales señalan que este proyecto disminuye significativamente la disposición de residuos sólidos y reduce las emisiones de dióxido de carbono en una buena proporción, lo que se podría reflejar tanto en un beneficio ambiental como en uno económico, por la venta de bonos de carbono. Los costos de este proyecto son menores a los que representaría una planta de incineración, sin embargo, son mayores a los de un relleno sanitario.

El indicador social indica lo contrario, siendo la incineración el tratamiento que genera una mayor cantidad de empleos. Sin embargo, se deben considerar las prioridades socio-políticas para poder elegir la más adecuada de acuerdo a la situación actual y a los planes a futuro para la localidad.

6.2 Recomendaciones.

Una consideración importante es la obtención de la información. Esta etapa esencial para el correcto funcionamiento de la herramienta. Se debe continuar con un trabajo de sensibilización de las autoridades para obtener una base de datos con información estandarizada, confiable y validada por la autoridad competente.

Actualmente, se cuenta ya con un cierto número de bases de datos con información relevante para los fines de este trabajo, por ejemplo, las bases de datos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), el SNIARN (Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales), entre otras, sin embargo, se debe continuar con la generación y actualización de bases de datos de las instancias locales.

Estos esfuerzos se deben encaminar hacia la estandarización de las bases de datos, no sólo con el fin de la inclusión de las mismas a la herramienta desarrollada en este trabajo, sino también para la proposición y creación de nuevas herramientas que ayuden tanto en la evaluación ambiental de la situación local, como en la evaluación de distintas alternativas para la solución de los problemas actuales en materia ambiental. De este modo, cualquier desarrollo futuro, así como cualquier toma de decisiones, podrá tener la mayor cantidad de información disponible y de una manera más clara y accesible. Esta tarea corresponde ser fomentada por las autoridades tanto locales como federales, uniendo esfuerzos para promover censos, inventarios y otros estudios ambientales, económicos y sociales para la recopilación de la información. Esto es de suma importancia, ya que sin el apoyo institucional, no sólo no se podrá planear la estandarización de las bases, sino que ni siquiera se podrían construir los indicadores, ni mucho menos generar políticas orientadas por la información precisa.

Cabe resaltar que ésta se trata solo de una base para un desarrollo mayor, como un esfuerzo a futuro que debe contemplar el desarrollo de esta herramienta dentro de un sistema comprendido por herramientas del mismo tipo, enlazado a las bases de datos

gubernamentales como se mencionó anteriormente. Este sistema debe planearse de manera integral para tener la participación, tanto en el desarrollo como en la utilización, de las instancias involucradas en la materia y contar con su experiencia para el desarrollo con el fin de subsanar de la mejor manera las necesidades de cada una. Igualmente, se deberá contemplar la continua actualización del sistema para poder brindar el servicio requerido de la forma más precisa posible.

Otra recomendación es la importancia de considerar las estrategias políticas que sean aplicables en la toma de decisiones. Estas estrategias deben ser consideradas con mayor peso en el análisis de tecnologías, pues ellas indican la importancia o el peso que tiene un ámbito en la toma de decisiones de carácter público. Por ejemplo, puede presentarse el caso en el que las políticas vayan encaminadas hacia la desaparición de las plantas de generación de energía por combustibles fósiles, o el caso en el que las políticas gubernamentales vayan dirigidas a la promoción de proyectos que reduzcan la emisión de GEI. En este caso, el indicador de emisiones de dióxido de carbono equivalentes sería el de mayor importancia, pues contempla tanto las emisiones de GEI como la disminución en el uso de combustibles fósiles. De tal modo que la correcta asignación del peso de cada ámbito es fundamental para una evaluación más acertada.

Es necesario el desarrollo de mayores herramientas para la evaluación de tecnologías, tanto como la misma sociedad lo necesite. Primeramente, debe de hacerse un esfuerzo conjunto entre autoridades y centros de investigación para la obtención de más indicadores que puedan representar de mejor manera la situación actual del país en materia de residuos sólidos. Este conjunto de indicadores sería útil no solo para conocer la situación actual, sino para poder redirigir el país en este rubro.

Estos indicadores, aunado a un sistema de información nacional homogeneizado (realizado desde los niveles más pequeños como pueblos y municipios, hasta a nivel federal) permitirá tener un panorama más claro sobre la situación y dirección del país. Para poder utilizar esta información deben desarrollarse las herramientas necesarias para ayudar a los tomadores de decisión a realizar sus actividades con una mayor claridad y con una menor desinformación.

Otra recomendación es la de desarrollar un modelo probabilístico para poder relacionar los indicadores entre sí de acuerdo a las dependencias que tengan entre ellos. Con este análisis se propondría obtener una función que ayudara a complementar los indicadores entre sí, para poder estimar con mayor precisión la relación entre los requerimientos de la localidad y las características de la tecnología.

REFERENCIAS.

A. Karagiannidis, A. Papageorgiou, G. Perkoulidis, G. Sanida, P. Samaras. A multi-criteria assessment of scenarios on thermal processing of infectious hospital wastes: A case study for Central Macedonia. Grecia. Bioresource Technology, Volumen 100, Tomo 8, Abril 2009.

Banco Mundial, Technical Guidance Report: Municipal Solid Waste Incineration, 1999.

Barrandas R., A. Gestión integral de Residuos Sólidos Municipales, 2008.

BESEL, S.A. Biomasa: Gasificación, IDAE España, 2007.

Bingemer, H.G. and P.J. Crutzen. The production of methane from solid wastes". Journal of Geophysical Research, 92 (D2): 2181-2187. 1987

Cadavid, Carlos, et al. Tratamiento y Valorización Energética de Residuos. España : Ediciones Díaz de Santos, 2005

CFE. Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico (COPAR de Generación), 2009

De la Torre, F. Gestión integral de residuos sólidos urbanos, Distrito metropolitano de Quito, 2009

Bollinger, D. & Pictet, J., Multiple criteria decision analysis of treatment and land-filling technologies for waste incineration residues, Omega, Volumen 36, Tomo 3, Special Issue on Multiple Criteria Decision Making for Engineering, Junio 2008.

E. Gomez, D. Amutha Rani, C.R. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise, A.R. Boccaccini, Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review; Journal of Hazardous Materials, 2009

Estrada, C.A. Gasificación de biomasa para producción de combustible de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor, 2004.

EPA, Standards of Performance for New Stationary Sources and Emission Guidelines for Existing Sources: Commercial and Industrial Solid Waste Incineration Units; Final Rule, 2010.

FEMISCA A.C., Evaluación y selección de tecnologías para el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos urbanos generados en el distrito federal. 2009.

Feria T., J.M., Indicadores de sostenibilidad: un instrumento para la gestión humana.

Gobierno de Chile. Tecnologías de tratamiento y disposición final de residuos sólidos domiciliarios. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Diciembre 2001.

Gobierno de Costa Rica. Plan Nacional de Manejo de Desechos.

H. Boerrigter, H.P. Calis, D.J. Slort, H. Bodenstaff, A.J. Kaandorp, H. den Uil, L.P.L.M. Rabou, Gas Cleaning for Integrated Biomass Gasification (BG) and Fischer-Tropsch (FT) Systems, 2004

Hofbauer, H., Fleck, V. T., Rauch, R., Mackinger, H., & Fercher, E. Developments in Thermochemical Biomass Conversion, 1997.

IIE, Actualización del inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990-2006 en la categoría de desechos, 2008

Instituto de la Sostenibilidad de los Recursos, Sistemas de Recuperación del rechazo de la fracción resto; soluciones clásicas y tecnologías emergente, Castilla-La Mancha, España, 2007.

IPCC, Guide lines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual, 1996.

IPCC. The Physical Science Basis, Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the IPCC. 2007.

IPCC. The Science of Climate Change, Contribution of Working Group 1 to the Second Assessment Report of the IPCC. 1995.

IWT, An overview of the history and capabilities of the Thermoselect technology, 2008.

J. Hokkanen, P. Salminen, E. Rossi, M. Ettala, The choice of a solid waste management system using the Electre II decision-aid method, Waste Management & Research, Volumen 13, Tomo 2, pp. 175-193, 1995.

Juniper Consultancy Services Ltd. (2009). Recuperado el 16 de Noviembre de 2009, de Waste Reports:
http://www.wastereports.com/information_sheets/Pyrolysis%20and%20Gasification%20Factsheet.pdf

Lahey, John D., Clean energy solution: plasma gasification, 2008

Limerick, Clare, Kerry Councils, Feasibility study of thermal treatment options for waste in the Limerick / Clare / Kerry region, 2005.

Maheshwar, D. Biomass gasification in India — DNES activities, 1989.

Malkow, T., Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal. Waste management, pp. 53-79, 2004.

Marta Herva, Ramon Hernando, Eugenio F. Carrasco, Enrique Roca, Development of a methodology to assess the footprint of wastes, Journal of Hazardous Materials, Volumen 180, Tomo 1-3, 15 Agosto 2010.

McKendry, P. Energy production from biomass (part 3) gasification technologies, 2002.

México. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2007.

OECD, Environmental Indicators: Development, measurement and use. Reference paper, 2003.

Ortiz, L., La biomasa como fuente de energía renovable, 2006.

Pilavachi, P., Chatzipanagi, A., Spyropoulou, A., Evaluation of hydrogen production methods using the Analytic Hierarchy Process, International Journal of Hydrogen Energy, Volumen 34, Tomo 13, Julio 2009.

Plasco Energy Group, Environmental screening report, Junio 2011.

Plasco Energy Group, Demonstration Project: Final Assessment Report, 2008 - 2011.

Plasco Energy Group, Overview of Plasco's MSW Conversion Process, 2010.

Powell, Jane C., The evaluation of waste management options, Waste Management & Research, Volumen 14, Tomo 6, Diciembre 1996.

Ragnar Warnecke. Gasification of biomass comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier, Biomass and Bioenergy, Volumen 18, 2000.

Rodríguez M., D. Valorización integral de residuos por medio de la gasificación por plasma. Tecnología SPGV y proceso IPGCC

Samudra Vijay, L., T. Molina y Mario J. Molina. Cálculo de emisiones de contaminación atmosférica por uso de combustibles fósiles en el sector eléctrico mexicano, 2004.

SEMARNAT, Compendio de Estadísticas Ambientales, 2008

SEMARNAT, Criterios para la ubicación, operación y cierre de infraestructura ambiental para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial., 2010.

SEMARNAT, Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009 - 2012, 2008.

SENER, Prospectiva del Sector eléctrico, México, 2010.

Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, Base de datos estadísticos, 2010.

Tabasaran, O. Gas production from landfill; Household Waste Management, New York, USA, pp. 159-175. 1981

Tchobanoglous, G. y H.S. Theisen; Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill, Inc. International Ed., 1996.

Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., Leprince, P., Atmospheric pressure plasmas: a review. Spectrochimica Acta B, pp. 2-30, 2006.

Themelis, N. J. An overview of the global waste-to-energy industry, 2006.

Thermoselect. (2009). Thermoselect. Recuperado el 16 de Noviembre de 2009, de www.thermoselect.com

TNO Environmental, Case Study: Thermoselect Facility Karlsruhe, 2002.

V. Belgiorno, G. De Feo, C. Della Rocca, R. M. A. Napoli, Energy from gasification of solid wastes, Waste Management, Volumen 23, Tomo 1, pp. 1-15, 2003.

Wann-Ming, W., An integrated expert system/operations research approach for the optimization of waste incinerator siting problems. Knowledge-Based Systems, pp. 267-178, 2005.

Wilson, D. C. Waste Management, Planning, Evaluation, Technologies, 1981.

REFERENCIAS DE PÁGINAS DE INTERNET.

Alter NRG Plasma Gasification System <http://www.alternrg.com/>. Consultada el 16 de noviembre de 2009.

Alternative Energy News, <http://www.alternative-energy-news.info/>. Consultada el 4 de febrero de 2010.

CONAPO, <http://www.conapo.gob.mx>. Consultada el 27 de junio de 2010.

Dirección General de Normas, <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/inicio.do>

Environmental Law Institute, <http://www.eli.org/>

ETEISA, México, <http://www.eteisa.com/>. Consultada el 25 de abril de 2010.

European Environment Agency, <http://www.eea.europa.eu/>. Consultada el 21 de octubre de 2010.

Gasificación de biomasa <http://www.biomassgasification.com/>. Consultada el 22 de septiembre de 2009.

Gasification <http://www.ciwmb.ca.gov/Organics/Conversion/Gasification/>. Consultada el 2 de octubre de 2009.

Gasification Technologies Council, <http://http://www.gasification.org/>. Consultada el 8 de septiembre de 2009.

Greenhouse Gas Protocol, <http://www.ghgprotocol.org/>. Consultada el 18 de noviembre de 2010.

INEGI, <http://www.inegi.gob.mx>. Consultada el 18 de agosto de 2011.

Instituto Nacional de Ecología, <http://ine.gob.mx/>

RECOVERED ENERGY SYSTEM, <http://www.recoveredenergy.com/>. Consultada el 16 de noviembre de 2009.

RETScreen International, <http://www.retscreen.net/>. Consultada el 17 de mayo de 2010.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, <http://www.semarnat.gob.mx>

Solena Plasma Gasification and Vitrification, <http://www.solenagroup.com/>. Consultada el 19 de noviembre de 2009.

T.M.C. Asser Instituut, <http://http://www.asser.nl/>

The Encyclopedia of Earth, <http://www.eoearth.org/>

Thermoselect <http://www.thermoselect.com>

TSS Internacional. www.tssinternacional.com. Consultada el 16 de noviembre de 2009.

Waste to energy, <http://www.wastetoenergy.es/empresa.htm>. Consultada el 6 de diciembre de 2009.

Westinghouse Plasma Corporation (WPC) <http://www.westinghouse-plasma.com/>. Consultada el 19 de noviembre de 2009.

BIBLIOGRAFÍA.

Domenichini, R. Combined production of hydrogen and power from heavy oil gasification Pinch analysis, thermodynamic and economic evaluations. 2010.

Banco Mundial, The little Green Data Book, 2007.

Brown D., Gassner, M., Fuchino, T., Marechal, F., Thermo-economic analysis for the optimal conceptual design of biomass gasification energy conversion systems. Applied Thermal Engineering, pp. 2137-2152, 2009.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Ley del Servicio Público de Generación de Energía, 2011.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 2007.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Ley General de Salud, 2011.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2007.

CEPAL, OLADE, GTZ, Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe: Guía para la formación de políticas energéticas, 2003.

Ducharme, C., Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes, 2010.

EPA, USA. 40 CFR Part 60, Standards of Performance for New Stationary Sources and Emission Guidelines for Existing Sources: Commercial and Industrial Solid Waste Incineration Units; Final Rule, 2011.

EPA, USA. Decision Maker's guide to solid waste management. Second Edition, 1995.

Esquer Verdugo, Rosario Alejandro. Reciclaje y tratamiento de los residuos sólidos urbanos. Tesis. IPN, ESIA Unidad Zacatenco, 2009.

GDF, Ley Ambiental de Distrito Federal, 2000.

GDF, Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2003.

Guidelines for municipal solid waste management in the Mediterranean Region, 2005

Gutiérrez, V., Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos. México, 2006.

Hernández-Berriel, Ma. C., Márquez-Benavides, L., González-Pérez, D. J., Buenrostro-Delgado, O., The effect of moisture regimes on the anaerobic degradation of municipal solid waste from Metepec (México), Waste Management, 2008.

INEGI, INE, SEMARNAP, Indicadores de Desarrollo Sustentable en México, 2000.

JICA, Estudio sobre el manejo de residuos sólidos para la Ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos, 1999.

Martínez, J. Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe, 2005.

México, Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

México, Programa especial de cambio climático 2009-2012.

OECD, OECD Environmental Indicators. Reference paper.

Pacheco Yañez José Luis. Reúso de Residuos Sólidos. Tesis UNAM, Fac. de Ingeniería. México. 1994.

Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea, Directiva 1989/369/CE, relativa a la prevención de la contaminación atmosférica procedente de nuevas instalaciones de incineración de residuos municipales , 1989.

Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea, Directiva 1989/429/CE, Relativa a la reducción de la contaminación atmosférica procedente de instalaciones existentes de incineración de residuos municipales, 1989.

Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea, Directiva 1994/67/CE, relativa a la incineración de residuos peligrosos, 1994.

Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea, Directiva 2000/76/EC, on the incineration of waste, 2000.

Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea, Directiva 2008/98/CE, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas, 2008.

Pavlas, M., Tous, M., Bebar, L., Stehlik, P., Waste to energy – An evaluation of the environmental impact. Applied Thermal Engineering, 2009.

Salgado, R., Altomonte, H., Indicadores de sustentabilidad, 1990 -1999. Chile, 2001.

Searcy, E., Flynn, P. A criterion for selecting renewable energy processes, 2010.

Segnestam, L. Desarrollo de indicadores. Lecciones aprendidas de América Central, 2000.

SEMARNAT, INE, Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos, 2006

SMADF, Estrategia local de acción climática del Distrito Federal, 2006.

SMADF, Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero y carbón negro de la ZMVM, 2008.

SMADF, Inventario de emisiones, Gases de Efecto Invernadero, ZMVM, 2006.

SMADF, Inventario de Residuos sólidos del Distrito Federal, 2006

SMADF, Inventario de Residuos sólidos del Distrito Federal, 2008

SMADF, Inventario de Residuos sólidos del Distrito Federal, 2009

ANEXO A. VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LOS TRATAMIENTOS TERMO-QUÍMICOS.

Variables Ambientales	
1	Ahorro de combustibles fósiles
2	Contaminación del agua
3	Contaminación del suelo
4	Cumplimiento de la Normatividad
5	Daño potencial al medio ambiente ante fallas del sistema
6	Daños a la salud
7	Emisiones al aire
8	Emanación de olores desagradables
9	Generación de agentes patógenos
10	Generación y/o proliferación de vectores
11	Peligrosidad de los residuos del tratamiento
12	Polvo
13	Ruido

1. Ahorro de combustibles fósiles.
Al utilizar la energía producida por los tratamientos se produce una cantidad de energía que de no ser producida por el tratamiento, sería producida de manera convencional, en una central eléctrica utilizando combustibles fósiles. (Hokkanen, Salminen, Rossi, & Ettala, 1995)
2. Contaminación del agua.
Los tratamientos térmicos estudiados tienen como subproductos del proceso gases generalmente tóxicos o contaminantes; estos gases deben ser depurados para no impactar en las emisiones al aire, los equipos mayormente utilizados para este fin utilizan agua para la limpieza de los gases. (Powell, 1996).
3. Contaminación del suelo.
Se debe tomar en cuenta el grado de contaminación al suelo que podría representar la operación de cada uno de los tratamientos, ya sea por sus residuos o por su operación. (Powell, 1996).
4. Cumplimiento de la normatividad.
Se debe tener completo apego a la normatividad nacional por parte de cada uno de los tratamientos. (FEMISCA, A.C., 2009)
5. Daño potencial ante fallas del sistema.
En caso de que por cualquier razón se presente una falla inesperada en alguna etapa del proceso del tratamiento, puede presentarse un daño potencial al medio ambiente. (FEMISCA, A.C., 2009).
6. Daños a la salud.
Esta variable es un parámetro que indica los posibles daños a la salud de los seres humanos

que podrían presentarse con la operación de cada uno de los tratamientos. (FEMISCA, A.C., 2009).

7. Emisiones al aire.

Esta variable refleja la posibilidad de evitar la emisión al aire de partículas y gases que sean potencialmente dañinos a la salud (Karagiannidis, Papageorgiou, Perkoulidis, Sanida, & Samaras, 2010).

8. Emanación de olores desagradables.

Esta variable toma en cuenta la presencia de olores desagradables durante la operación de la planta que se presentan en cada uno de los tratamientos. (FEMISCA, A.C., 2009).

9. Generación de agentes patógenos.

Esta variable indica la generación de microorganismos patógenos presentes en alguno de los procesos o subproductos de los tratamientos (Herva, Hernando, Carrasco, & Roca, 2010).

10. Generación y/o proliferación de vectores.

La proliferación de fauna nociva es una variable que debe ser considerada para evitar afectaciones a la salud y al medio ambiente (Herva, Hernando, Carrasco, & Roca, 2010).

11. Peligrosidad de los residuos del tratamiento.

Esta variable indica el carácter de peligrosidad que podrá ser atribuido a los residuos de cada uno de los tratamientos. En caso de ser considerados como residuos peligrosos, los residuos del tratamiento deberán recibir un tratamiento o disposición final de acuerdo a su peligrosidad (Herva, Hernando, Carrasco, & Roca, 2010).

12. Polvo.

Esta variable indica la generación de polvo por cada uno de los tratamientos, lo cual representa afectaciones tanto en la salud humana como en el equilibrio ecológico de la zona (Hokkanen, Salminen, Rossi, & Ettala, 1995).

13. Ruido.

Esta variable indica el ruido generado en los tratamientos, lo cual representa afectaciones tanto en la salud humana como en el equilibrio ecológico de la zona (Hokkanen, Salminen, Rossi, & Ettala, 1995).

Variables Económicas	
14	Consumo energético
15	Costo del tratamiento
16	Costos de inversión
17	Costos de mantenimiento
18	Costos de operación
19	Costos de producción de energía
20	Costo de disposición de los residuos municipales

14. Consumo Energético.

Contempla el total de la energía eléctrica que debe ser suministrada a todos los procesos del tratamiento para que estos operen correctamente. (SEMARNAT, 2010)

15. Costo del tratamiento.

Esta variable se basa en el costo de transporte de los residuos (en caso de ser necesario), costos de operación de las plantas de tratamiento y el costo de la disposición final de los residuos del tratamiento (Karagiannidis, Papageorgiou, Perkoulidis, Sanida, & Samaras, 2010)

16. Costos de Inversión.

Este es el costo total que implica la adquisición de todos los equipos y accesorios necesarios para el correcto funcionamiento del tratamiento, así como el costo de las obras civiles requeridas en conjunto con la mano de obra utilizada (SEMARNAT, 2010)

17. Costos de Operación.

Consiste en los gastos relacionados con la operación de la unidad, incluye los salarios, materias primas, etc. (Pilavachi, Chatzipanagi, & Spyropoulou, 2009)

18. Costos de Mantenimiento.

Consiste en los gastos relacionados con el mantenimiento de la unidad, incluye los costos de mantenimiento preventivo del equipo (Pilavachi, Chatzipanagi, & Spyropoulou, 2009).

19. Costos de producción de energía.

Esta variable refleja el costo de producir energía eléctrica a partir de los residuos sólidos urbanos a través de los tratamientos en estudio. (SEMARNAT, 2010).

20. Costo de disposición.

El costo de disposición es la cuota que se cobra en distintos lugares (estaciones de transferencia, rellenos sanitarios, centros de reciclaje, etc.) por el servicio de disposición de los residuos sólidos. También se le conoce como tipping fee. Esta variable indica el costo que representa este servicio (Cadavid, 2005).

Variables Sociales	
21	Aceptación social
22	Afectación a la estética
23	Desvalorización de las propiedades linderas
24	Distancia de amortiguamiento a la zona urbana
25	Generación de nuevos empleos
26	Crecimiento poblacional
27	Nivel de capacitación (mano de obra calificada)
28	Riesgo a futuras generaciones
29	Riesgo laboral
30	Tamaño de la población
31	Tasa de generación de residuos de la población.
32	Planes de desarrollo en los alrededores
33	Posibilidad de cuotas a los ciudadanos

21. Aceptación social.

La aceptación social es uno de los factores sociales más importantes a considerar. Esta

variable evalúa la aceptación por parte de la población sobre la instalación y operación de los tratamientos (Karagiannidis, Papageorgiou, Perkoulidis, Sanida, & Samaras, 2010).

22. Afectación a la estética.

La estética es un factor que no debe dejar de considerarse. Esta variable evalúa la afectación a la estética de las propias instalaciones así como de todas las actividades que se realicen en el área relacionadas con los tratamientos (Wann-Ming, 2005).

23. Desvalorización de las propiedades linderas.

En ocasiones la instalación de plantas de tratamiento o sitios de disposición final ocasionan una desvalorización de las propiedades adyacentes al sitio. Esto puede generar descontento de la población y evitar la instalación de los tratamientos en ese sitio (Wann-Ming, 2005).

24. Distancia de amortiguamiento a la zona urbana.

De acuerdo a la normatividad, se debe contemplar una zona de amortiguamiento para la instalación de cualquier tipo de planta donde se lleven a cabo procesos que puedan representar algún impacto ambiental o social. Esta variable indica la distancia mínima que se recomienda considerar como zona de amortiguamiento para cada uno de los tratamientos (Belgiorno, De Feo, Della Rocca, & Napoli, 2003).

25. Generación de nuevos empleos.

Este es un factor social muy importante y que está contemplado dentro de las estrategias municipales de desarrollo social. Esta variable representa la cantidad de empleos generados en relación con la energía generada (Bollinger & Pictet, 2008).

26. Crecimiento poblacional.

La tasa del crecimiento poblacional da una perspectiva a futuro de la cantidad de habitantes que habitarán la localidad, lo cual permite estimar el volumen de residuos que se generarán y deberán ser tratados en un futuro (Barrandas, 2008)

27. Nivel de capacitación (mano de obra calificada).

Esta variable indica la necesidad de contratar personal calificado y el nivel de preparación que éste debe tener para poder laborar en la planta de tratamiento. Un nivel de capacitación más alto representará mayores sueldos y mayores gastos de operación (Tendero, Tixier, Tristant, Desmaison, & Leprince, 2006).

28. Riesgo a futuras generaciones.

Esta variable debe ser contemplada para evitar la afectación de las futuras generaciones, siendo evaluado como un riesgo bajo, medio o alto (Bollinger & Pictet, 2008).

29. Riesgo laboral.

El riesgo laboral debe ser contemplado en todo diseño de cualquier tipo de instalación. (Bollinger & Pictet, 2008).

30. Tamaño de la población.

El tamaño de la población es una variable importante para la selección de la tecnología de tratamiento, pues de acuerdo a éste será el tipo de residuos, su composición, su tasa de generación, así como los recursos económicos con los que contará para la adquisición de la tecnología (Barrandas, 2008)

31. Tasa de generación de residuos de la población.

La tasa de generación de residuos indica la cantidad de residuos que se generan en la población. Esta información es de utilidad para poder determinar la capacidad de tratamiento requerida de la planta (Barrandas, 2008).

32. Planes de desarrollo en los alrededores.

Los planes de las autoridades para las zonas cercanas a las posibles instalaciones de la planta de tratamiento deben ser contemplados para no interponer los intereses y necesidades de la planta con los de los planes a futuro. (Wann-Ming, 2005)

33. Posibilidad de cuotas a los ciudadanos.

La aceptación de los ciudadanos al cobro de cuotas por la gestión de los residuos en la localidad, por parte de la empresa o de las autoridades. (Wann-Ming, 2005)

Variables Técnicas	
34	Área requerida
35	Capacidad de tratamiento
36	Tiempo de vida útil
37	Condiciones atmosféricas favorables
38	Disposición de los Residuos del tratamiento
39	Distancia de tecnología con respecto a los puntos de recolección
40	Eficiencia del proceso
41	Experiencia en el proceso
42	Facilidad de arranque
43	Facilidad de operación
44	Flexibilidad al cambio de características de los residuos de ingreso
45	Generación de energía / energía recuperada
46	Necesidades de mantenimiento
47	Nivel de separación y/o segregación de residuos para el adecuado funcionamiento de la tecnología (porcentaje de orgánicos e inorgánicos)
48	Parámetros fisicoquímicos de residuos que ingresan al proceso (humedad, peso volumétrico, poder calorífico)
49	Porcentaje de recuperación
50	Porcentaje de residuos transformados
51	Tamaño de los residuos a ingresar (pre-tratamiento)
52	Tiempo de transformación de los residuos
53	Tipo de Residuos que pueden ser tratados
54	Transporte
55	Uso de agua
56	Uso de los Residuos del tratamiento
57	Flexibilidad para posterior expansión

34. Área requerida.

Esta variable toma en consideración el área necesaria para el establecimiento de las instalaciones requeridas para el proceso. Esta variable será evaluado en Ha/MW producido para tener un valor de comparación entre las tecnologías. Áreas más pequeñas se reflejan en menores costos de inversión (Powell, 1996).

35. Capacidad de tratamiento.

Esta variable indica la cantidad de residuos que pueden ser ingresados en el tratamiento por unidad de tiempo. Capacidades de tratamiento mayores representan mayores beneficios tanto económicos como ambientales (Wann-Ming, 2005).

36. Tiempo de Vida útil.

Esta variable se refiere al tiempo de vida útil que tiene la o las unidades principales del tratamiento. A mayores tiempos de vida útil, la inversión y la tasa de retorno se verán beneficiados (Hofbauer, Fleck, Rauch, Mackinger, & Fercher, 1997).

37. Condiciones atmosféricas favorables.

Esta variable indica el impacto de las condiciones atmosféricas en el tratamiento o si es preferente algún tipo de condición atmosférica para el correcto funcionamiento del tratamiento. Esto puede repercutir en los procesos, los residuos de ingreso, las instalaciones necesarias, el equipo y maquinaria, etc. (SEMARNAT, 2010).

38. Disposición de los residuos del tratamiento.

Esta variable toma en cuenta si existe o no la necesidad de disponer los residuos generados durante el tratamiento, y el tipo de disposición final necesaria para estos residuos. Esta variable afecta directamente los costos para el transporte y la disposición de los residuos del tratamiento (Maheshwar, 1989).

39. Distancia de la tecnología con respecto a los puntos de recolección.

Esta variable indica la distancia recomendada a la cual deben estar localizados los puntos de recolección con el fin de minimizar los costos de transporte (Barrandas, 2008).

40. Eficiencia del proceso.

Esta variable indica en forma porcentual la relación entre la energía total suministrada para llevar a cabo todo el proceso y la energía total entregada o generada al final del mismo (Pilavachi, Chatzipanagi, & Spyropoulou, 2009)

41. Experiencia en el proceso.

Indica si existe experiencia nacional o internacional sobre la utilización del proceso, pues esto es útil para comprobar su eficacia y tener un mercado abierto tanto de proveedores como de clientes (Warnecke, 2000)

42. Facilidad de arranque y paro.

Esta variable refleja la facilidad o los problemas que se pueden presentar al momento del arranque o del paro de la unidad. Será un criterio cualitativo (Belgiorno, De Feo, Della Rocca, & Napoli, 2003)

43. Facilidad de operación.

Esta variable indica la complejidad del proceso en relación con las actividades a realizar por los operadores encargados del proceso. (Karagiannidis, Papageorgiou, Perkoulidis, Sanida, & Samaras, 2010).

44. Flexibilidad al cambio de características de los residuos de ingreso.
Esta variable se basa en que en los residuos sólidos urbanos tienen una composición variable a través del tiempo, dependiendo de factores como la época del año, y otros factores sociales, económicos y ambientales. Debido a esto, es de gran importancia la flexibilidad para ingresar residuos de diferente composición sin alterar de manera significativa el resultado del proceso (Bollinger & Pictet, 2008)
45. Generación de energía.
Esta variable muestra la cantidad de energía producida al ingresar una tonelada de residuos sólidos urbanos al proceso. Mientras mayor sea esta relación, mayor será el beneficio económico del tratamiento (Cadavid, 2005).
46. Necesidades de mantenimiento.
Esta variable indica los requerimientos de mantenimiento preventivo del proceso. (McKendry, 2002).
47. Nivel de separación y/o segregación de residuos (porcentaje de orgánicos e inorgánicos).
Esta variable se basa en las necesidades de la tecnología en cuanto a la composición de los residuos que ingresarán al proceso, indicando si los residuos ingresados deben ser preferentemente orgánicos o inorgánicos y en caso de ser necesaria, la inclusión de una separación previa de estas fracciones (SEMARNAT, 2010).
48. Parámetros fisicoquímicos de residuos que ingresan al proceso (humedad, peso volumétrico, poder calorífico).
Estas variables proporcionan información sobre los requerimientos de las propiedades de los residuos que se ingresarán al sistema, indicando los valores requeridos de cada uno de ellos para el correcto funcionamiento del proceso (Cadavid, 2005)
49. Porcentaje de recuperación.
Esta variable indica el porcentaje de residuos generados por el tratamiento que pueden ser reciclados o reutilizados (Hokkanen, Salminen, Rossi, & Ettala, 1995)
50. Porcentaje de residuos eliminados.
Esta variable muestra el porcentaje del volumen de los residuos ingresados que es eliminado a la salida del proceso. Un mayor porcentaje de estos residuos disminuye la necesidad de tratamiento o disposición final de estos residuos (Powell, 1996).
51. Tamaño de los residuos a ingresar.
Esta variable muestra el tamaño de los residuos requerido para su ingreso al sistema, determinando la necesidad de agregar un pre-tratamiento para modificar el tamaño de los mismos (SEMARNAT, 2010).
52. Tiempo de transformación de los residuos.
Esta variable evalúa el tiempo total requerido para llevar a cabo la transformación de los residuos sólidos ingresados al sistema en energía (Themelis, 2006).
53. Tipo de residuos que pueden ser tratados.
Esta variable indica el tipo de residuos que pueden ser ingresados al tratamiento, por ejemplo residuos peligrosos o algunos residuos de manejo especial (Karagiannidis, Papageorgiou, Perkoulidis, Sanida, & Samaras, 2010).

54. Transporte.

Esta variable indica el tipo de transporte y la distancia de su recorrido. (Powell, 1996)

55. Uso de agua.

Esta variable indica el consumo de agua requerido para llevar a cabo el tratamiento de los residuos. (Karagiannidis, Papageorgiou, Perkoulidis, Sanida, & Samaras, 2010).

56. Uso de los Residuos del tratamiento.

Variable cualitativo que enumera una lista de los posibles usos que se le pueden dar a los residuos del tratamiento, tanto por su reuso como por su reciclaje (Wilson, 1981).

57. Flexibilidad para posterior expansión

Indica la posibilidad de una futura ampliación de la capacidad de tratamiento de la planta. De acuerdo a las necesidades de la localidad, es muy recomendable que la planta tenga una posterior expansión (Themelis, 2006).

ANEXO B. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL.

A continuación se muestra la tabla del Potencial de Calentamiento Global de varios gases .

Designación Industrial o Nombre Común (años)	Fórmula Química	Tiempo de Vida (años)	Eficiencia Radiactiva ($W m^{-2} ppb^{-1}$)	SAR ⁺ (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Dióxido de Carbono	CO ₂	Ver nota ^a	^b 1.4x10 ⁻⁵	1	1	1	1
Metano ^c	CH ₄	12 ^c	3.7x10 ⁻⁴	21	72	25	7.6
Oxido nitroso	N ₂ O	114	3.03x10 ⁻³	310	289	298	153
Substancias controladas por el Protocolo de Montreal							
CFC-11	CCl ₃ F	45	0.25	3,800	6,730	4,750	1,620
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	0.32	8,100	11,000	10,900	5,200
CFC-13	CCIF ₃	640	0.25		10,800	14,400	16,400
CFC-113	CCl ₂ FCCIF ₂	85	0.3	4,800	6,540	6,130	2,700
CFC-114	CCIF ₂ CCIF ₂	300	0.31		8,040	10,000	8,730
CFC-115	CCIF ₂ CF ₃	1,700	0.18		5,310	7,370	9,990
Halon-1301	CBrF ₃	65	0.32	5,400	8,480	7,140	2,760
Halon-1211	CBrClF ₂	16	0.3		4,750	1,890	575
Halon-2402	CBrF ₂ CBrF ₂	20	0.33		3,680	1,640	503
Tetracloruro de Carbono	CCl ₄	26	0.13	1,400	2,700	1,400	435
Metil bromuro	CH ₃ Br	0.7	0.01		17	5	1
Metil cloroformo	CH ₃ CCl ₃	5	0.06		506	146	45
HCFC-22	CHClF ₂	12	0.2	1,500	5,160	1,810	549
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	1.3	0.14	90	273	77	24
HCFC-124	CHClF ₂ CF ₃	5.8	0.22	470	2,070	609	185
HCFC-141b	CH ₃ CCl ₂ F	9.3	0.14		2,250	725	220
HCFC-142b	CH ₃ CCIF ₂	17.9	0.2	1,800	5,490	2,310	705
HCFC-225ca	CHCl ₂ CF ₂ CF ₃	1.9	0.2		429	122	37
HCFC-225cb	CHClF ₂ CCIF ₂	5.8	0.32		2,030	595	181
Hidrofluorocarbonos							
HFC-23	CHF ₃	270	0.19	11,700	12,000	14,800	12,200
HFC-32	CH ₂ F ₂	4.9	0.11	650	2,330	675	205
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	29	0.23	2,800	6,350	3,500	1,100
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14	0.16	1,300	3,830	1,430	435
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	52	0.13	3,800	5,890	4,470	1,590
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	1.4	0.09	140	437	124	38
HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃	34.2	0.26	2,900	5,310	3,220	1,040
HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	240	0.28	6,300	8,100	9,810	7,660
HFC-245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	7.6	0.28		3,380	1030	314
HFC-365mfc	CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃	8.6	0.21		2,520	794	241
HFC-43-10mee	CF ₃ CHFCHFCF ₂ CF ₃	15.9	0.4	1,300	4,140	1,640	500
Compuestos Perfluorinados							
Hexafluoruro de Azufre	SF ₆	3,200	0.52	23,900	16,300	22,800	32,600
Trifluoruro de Nitrogeno	NF ₃	740	0.21		12,300	17,200	20,700

Designación Industrial o Nombre Común (años)	Fórmula Química	Tiempo de Vida (años)	Eficiencia Radiactiva ($W m^{-2} ppb^{-1}$)	SAR [†] (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
(continuación)							
PFC-14	CF ₄	50,000	0.10	6,500	5,210	7,390	11,200
PFC-116	C ₂ F ₆	10,000	0.26	9,200	8,630	12,200	18,200
PFC-218		2,600	0.26	7,000	6,310	8,830	12,500
PFC-318		3,200	0.32	8,700	7,310	10,300	14,700
PFC-3-1-10		2,600	0.33	7,000	6,330	8,860	12,500
PFC-4-1-12		4,100	0.41		6,510	9,160	13,300
PFC-5-1-14		3,200	0.49	7,400	6,600	9,300	13,300
PFC-9-1-18		>1,000d	0.56		>5,500	>7,500	>9,500
trifluorometil sulfuro pentafluoruro		800	0.57		13,200	17,700	21,200
Eteres Fluorinados							
HFE-125		136	0.44		13,800	14,900	8,490
HFE-134		26	0.45		12,200	6,320	1,960
HFE-143a		4.3	0.27		2,630	756	230
HCFE-235da2		2.6	0.38		1,230	350	106
HFE-245cb2		5.1	0.32		2,440	708	215
HFE-245fa2		4.9	0.31		2,280	659	200
HFE-254cb2		2.6	0.28		1,260	359	109
HFE-347mcc3		5.2	0.34		1,980	575	175
HFE-347pcf2		7.1	0.25		1,900	580	175
HFE-356pcc3		0.33	0.93		386	110	33
HFE-449sl (HFE-7100)		3.8	0.31		1,040	297	90
HFE-569sf2 (HFE-7200)		0.77	0.3		207	59	18
HFE-43-10pccc124 (H-Galden 1040x)		6.3	1.37		6,320	1,870	569
HFE-236ca12 (HG-10)		12.1	0.66		8,000	2,800	860
HFE-338pcc13 (HG-01)		6.2	0.87		5,100	1,500	460
Perfluoropoleteres							
PFPME		800	0.65		7,620	10,300	12,400
Hidrocarburos y otros compuestos– Efectos Directos							
Dimetileter		0.015	0.02		1	1	<<1
Cloruro de Metileno		0.38	0.03		31	8.7	2.7
Metil cloruro		1.0	0.01		45	13	4

Fuente: Fourth Assessment Report, 2007, IPCC.

ANEXO C. PODER CALORÍFICO

En la siguiente tabla se muestra el poder calorífico de los RSU según el tipo de residuo.

Poder calorífico [kcal/kg]			
Tipo de Residuos	Como son recolectados	Tipo de Residuos	Como son recolectados
Comida y productos de comida		Textiles, goma, cuero	
Grasas	8,964	Textiles	4,422
Residuos de comida (mezclado)	998	Goma	6,050
Residuos de frutas	948	Cuero	4,167
Residuos de carne	4,235		
		Madera, árboles, etc	
Productos del papel		Residuos de jardín	1,445
Cartón	3,912	Madera verde	1,167
Revistas	2,919	Maderas duras	4,084
Papel periódico	4,431	Madera (mezclada)	3,689
Papel (mezclado)	3,777		
Cartones encerados	6,292	Vidrio, metales, etc.	
		Vidrio y mineral	47
Plásticos		Metal, latas de hojalata	167
Plásticos (mezclados)	7,834	Metal férreo	
Polietileno	10,382	Metal no férreo	
Poliestireno	9,123		
Poliuretano	6,224	Misceláneos	
Policloruro de vinilo	5,419	Barrido de oficinas	2,038
RSU domésticos	2,778		
RSU comercial	3,056	RSU	2,556

Fuente: (Tchobanoglous & Theisen, Integrates Solid Waste Managment: Engineering and Management Issues, 1996)

Cálculo del poder calorífico de los RSU de la Ciudad de México.

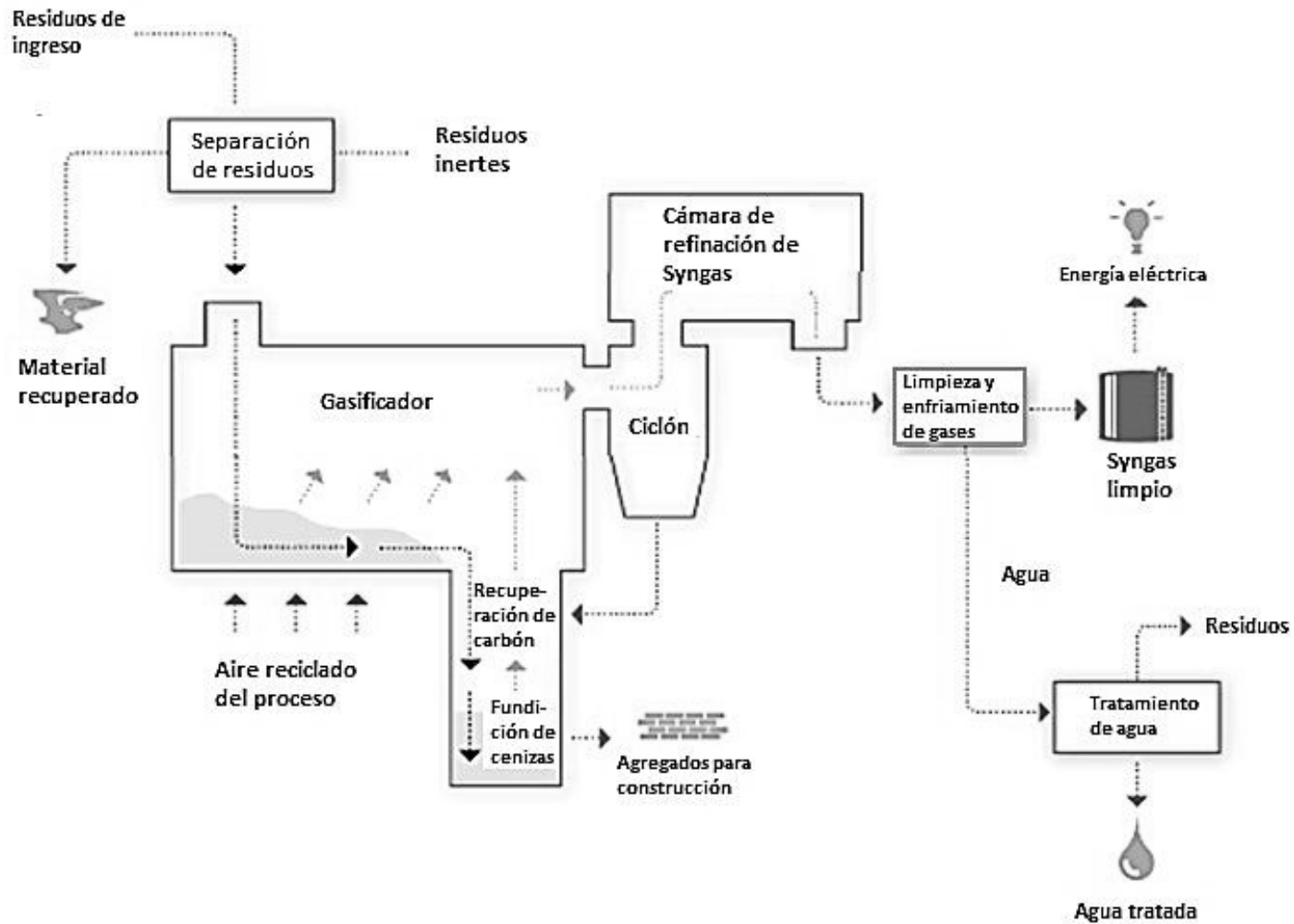
Tipo de Residuos	Como son recolectados	Porcentaje en RSU	Poder calorífico [kcal/kg]
Comida y productos de comida			
Grasas	8,964	0.054%	4.821
Residuos de comida (mezclado)	998	37.780%	377.048
Productos del papel			
Cartón	3,912	0.067%	2.618
Papel periódico	4,431	4.966%	220.065
Papel (mezclado)	3,777	10.326%	390.027
Cartones encerados	6,292	1.921%	120.856
Plásticos			
Plásticos (mezclados)	7,834	8.098%	634.421
Poliestireno	9,123	0.582%	53.096
Poliuretano	6,224	0.164%	10.223
Textiles, goma, cuero			
Textiles	4,422	2.548%	112.664
Cuero	4,167	0.109%	4.556
Madera, árboles, etc			
Residuos de jardín	1,445	3.208%	46.356
Madera (mezclada)	3,689	3.897%	143.750
Vidrio, metales, etc.			
Vidrio y mineral	47	7.290%	3.426
Total		81.011%	2,123.926

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO D. DIAGRAMAS DE PROCESO DE LAS TECNOLOGÍAS PARA EL CASO DE ESTUDIO.

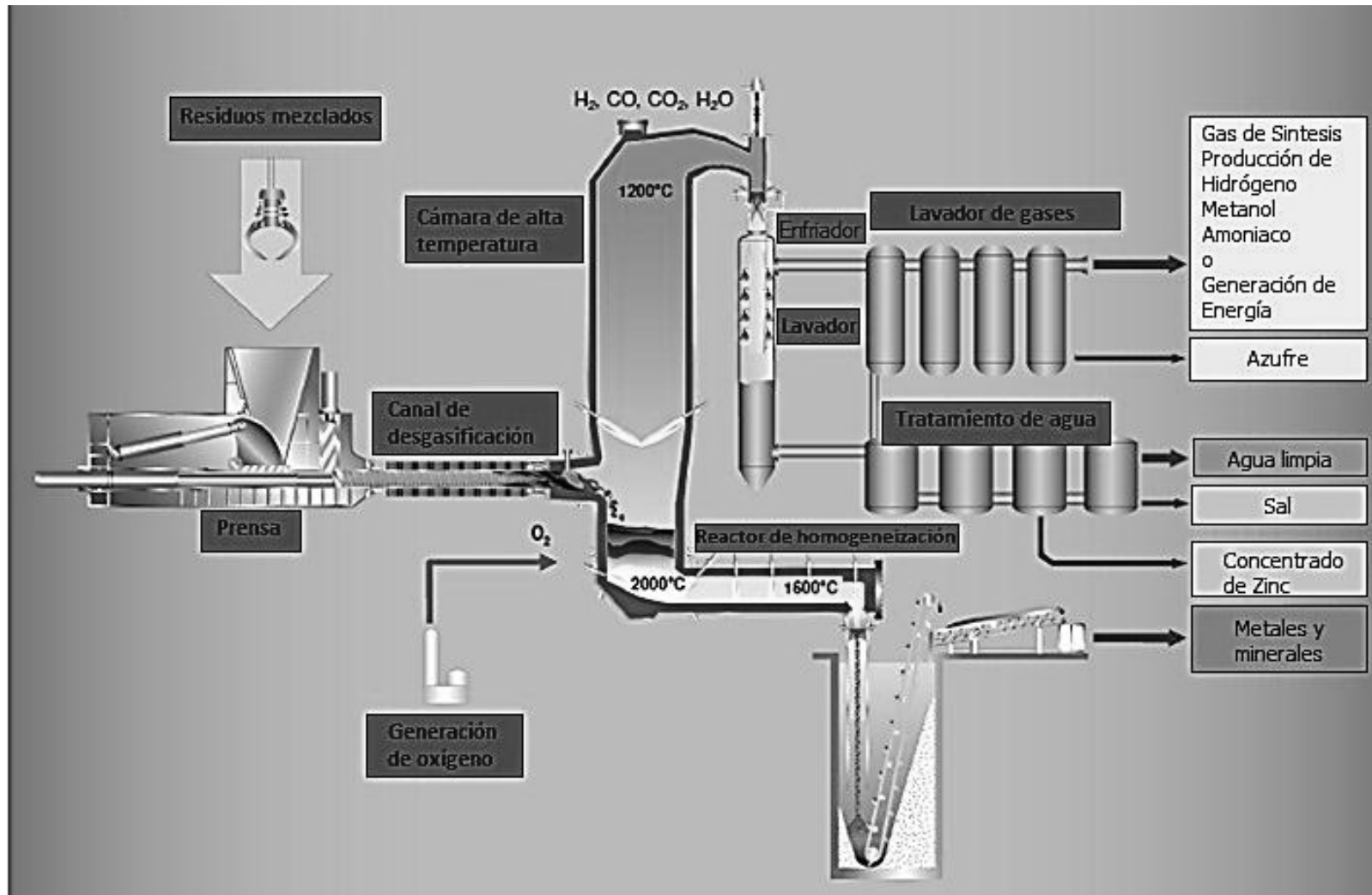
D.1 Plasco Energy Group.

Diagrama del proceso elaborada por el proveedor. (Plasco Energy Group, 2011).



D.2 Thermostelect.

Diagrama del proceso elaborada por el proveedor de la tecnología (Thermostelect, 2009).



ANEXO E. MANUAL DE USUARIO.

Este manual permitirá aprender a utilizar todas las funcionalidades básicas de la herramienta cuantitativa para la evaluación de tratamientos térmicos de residuos sólidos urbanos con potencial energético.

E.1 Pantalla principal.

La pantalla principal de la herramienta se muestra en la FIGURA 10. En esta pantalla es posible acceder los siguientes procedimientos:

Capturar un nuevo proyecto. Se puede ingresar a realizar esta acción seleccionando el botón “Nuevo Proyecto”.

Capturar o modificar la información sobre alguna localidad. Para realizar este proceso se debe seleccionar el botón “Datos por Localidad”.

Comparar de dos hasta cuatro proyectos previamente capturados. Esto se puede realizar seleccionando el botón “Comparar proyectos”.

Buscar proyectos previamente capturados. La búsqueda de proyectos que hayan sido anteriormente capturados se puede realizar conociendo alguno de los siguientes datos:

- Número de proyecto
- Nombre del proyecto
- Año de inicio
- Tipo de tratamiento
- Descripción del proyecto
- Empresa ofertante
- Entidad federativa
- Municipio

Al seleccionar cualquiera de estas opciones, la herramienta realizará una búsqueda dentro de la base de datos para mostrar los resultados que coincidan con el criterio de búsqueda seleccionado.

Mostrar todos los proyectos que han sido capturados. Para mostrar todos los proyectos que se han capturado basta con tener vacías todas las opciones de búsqueda y seleccionar el botón “Buscar”. La herramienta entonces mostrará un listado de todos los proyectos que se han capturado hasta ese momento.

Herramienta de evaluación

Nuevo Proyecto Datos por Localidad Comparar Proyectos

Busqueda por:

Número de proyecto:

Año de inicio:

Nombre del proyecto:

Empresa:

Tipo de tratamiento:

Entidad Federativa:

Descripción del proyecto:

Municipio:

Buscar



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**




FIGURA 10. PANTALLA PRINCIPAL DE LA HERRAMIENTA.

E.2 Ingreso de datos.

Los datos que pueden ser modificados son los datos sobre las características de la gestión de los residuos sólidos, los datos demográficos de la localidad y la información sobre el proyecto a evaluar.

E.2.1 Información sobre la localidad.

Para poder realizar la evaluación de cualquier proyecto, se debe contar con la información requerida sobre la localidad. Sin esta información es imposible realizar cálculo alguno. De igual manera, si se requiere modificar o actualizar alguno de los datos sobre la localidad previamente capturados, se deben seguir los siguientes pasos.

El primer paso para capturar esta información es dar clic en el botón “Datos por Localidad” en la pantalla principal de la herramienta. A continuación se mostrará la ventana *Información de la localidad*, como se muestra en la FIGURA 11.

Información de la Localidad

Modificar datos Guardar datos

Entidad Federativa: Municipio: Año: Ver datos

Sobre la localidad

Población total: [] [habitantes]

Tasa de generación de RSU: [] [kg/día.hab]

RSU generados en la localidad: [] [ton/día]

Porcentaje de RSU dispuestos: [] [%]

Sobre la disposición final en la localidad

Tipo de Relleno Sanitario:

Controlado

No controlado (profundidad >5m)

No controlado (profundidad <5m)

Sin categorizar

Metano recuperado en la localidad: [] [Gg/año]

Porcentaje de metano en el gas de Relleno Sanitario: [] [%]

Composición de los RSU de la localidad

Residuos de Alimentos: [] [%]

Grasas: [] [%]

Papel (mezclado): [] [%]

Papel periódico: [] [%]

Cartón: [] [%]

Cartón encerado: [] [%]

Plástico (mezclado): [] [%]

Poliestireno: [] [%]

Poliuretano: [] [%]

Textiles: [] [%]

Goma: [] [%]

Cuero: [] [%]

Residuos de jardinería: [] [%]

Madera: [] [%]

Vidrio: [] [%]

Hojalata: [] [%]

Metales: [] [%]

FIGURA 11. VENTANA DE CAPTURA DE LA INFORMACIÓN DE LA LOCALIDAD.

El siguiente paso es seleccionar la entidad federativa, el municipio y el año para el cual se desea capturar los datos. Dando clic en el botón “Ver Datos” se muestran, en caso de existir, los datos previamente capturados sobre dicha localidad en dicho año.

Si los datos ya fueron capturados previamente y se requiere cambiar alguno de ellos, se debe dar clic en el botón de menú “Modificar datos”. En caso de capturar datos nuevos, se pueden ingresar en los campos directamente. En ambos casos, es necesario llenar todos los campos dentro de los recuadros *Datos sobre la localidad* y *Datos sobre la disposición final en la localidad*. La composición de los residuos de la localidad debe ser ingresada en el recuadro correspondiente, pudiendo dejar espacios en blanco.

Una vez capturados los datos se debe dar clic en el botón de menú “Guardar datos”. En ese momento, los datos son guardados en la base de datos para su posterior uso.

E.2.2 Captura de un nuevo proyecto.

Para comenzar la evaluación de un nuevo proyecto, se debe capturar la información requerida para el cálculo de los indicadores. Primeramente, se debe dar clic en el botón “Nuevo Proyecto” en la pantalla principal. Aparecerá la ventana mostrada en la FIGURA 12.

The image shows a software window titled "Nuevo Proyecto". It contains several input fields and two buttons at the bottom. The fields are: "Número de proyecto:" with a text box containing the number "7"; "Tiempo de vida útil:" with a text box and "[años]" next to it; "Año de Inicio:" with an empty text box; "Nombre del proyecto:" with a large empty text area; "Tipo de Tratamiento:" with an empty text area; "Descripción del proyecto:" with a large empty text area; "Empresa:" with an empty text area; "Entidad Federativa:" with a dropdown menu; and "Municipio:" with a dropdown menu. At the bottom, there are two buttons: "Guardar" and "Cancelar".

FIGURA 12. CAPTURA DE DATOS PARA UN NUEVO PROYECTO.

El campo *Número de proyecto* asigna el siguiente número consecutivo automáticamente. Es necesario capturar el resto de los campos para poder continuar con la creación de un nuevo proyecto. Para ingresar el *Municipio* se debe seleccionar primeramente el campo de la *Entidad Federativa*, mostrando así únicamente los municipios dentro de dicha entidad.

Una vez capturados todos los datos se almacenan éstos en la base de datos dando clic en el botón guardar. Enseguida aparecerá la ventana para ingresar la información de la tecnología. Tal como se muestra en la FIGURA 13. En esta ventana se debe completar la captura de datos relativos al proyecto por evaluar.

La disponibilidad de la planta puede ser capturada tanto como el número de horas de operación de la planta por año o bien, como porcentaje de operación de la planta.

Las emisiones de CO₂ de la planta pueden capturarse de tres formas. La primera, ingresando las toneladas de CO₂ equivalentes emitidas por cada tonelada tratada por la planta, si así fueron presentadas. La segunda opción es ingresando las toneladas de CO₂ equivalentes emitidas por cada megawatt generado por la planta.

La tercera opción es en caso en que no se presente este dato en alguna de estas dos unidades, sino sean presentadas las emisiones de cada uno de los gases emitidos por la planta; en este caso se debe seleccionar la casilla "Las emisiones de CO₂ equivalente deben calcularse por los gases emitidos". Al seleccionarlo, se habilitarán las casillas debajo de ésta. En ellas se deben seleccionar el gas emitido y la concentración y el volumen de estas. Después de ingresar estos datos, se debe dar clic en el botón "Calcular", revisar el resultado en la casilla "Emisiones de CO₂" y si se está de acuerdo con ese resultado, dar clic en el botón "OK". Al presionar este botón, se llenará automáticamente la casilla de "Emisiones de CO₂".

Al capturar los campos de "Porcentaje de residuos aprovechables" y el de "Porcentaje de residuos transformados" se debe elegir la casilla "D" en caso de que el proceso primero procese los residuos y de los residuos de éste se aproveche el otro porcentaje. En caso que un porcentaje del total de los residuos sea separado y otro porcentaje sea utilizado para reciclaje, debe dejarse sin seleccionarse esta casilla.

En el momento de capturar los valores de la energía generada por el proceso y el consumo energético de la planta se puede optar por ingresarlos en unidades de la potencia instalada [MW] o por ingresarlo como la energía que se producirá en el transcurso de un año [MWh/año].

Igualmente, se deben capturar los datos sobre los costos y la flexibilidad de la tecnología. En el momento en que se complete la captura de los datos se continua presionando el botón "Guardar" y a continuación el botón "Continuar".

Datos del Proyecto

Datos del Proyecto

Número de Proyecto: Año de Inicio: Empresa:

Nombre del Proyecto: Entidad Federativa:

Tipo de Tratamiento: Municipio:

Descripción del proyecto:

Información del proyecto:

Tiempo de vida útil: [años]

Disponibilidad: [h/año]
 [%]
 [h/año]

Emisiones de CO2: [tonCO2eq/año]

Capacidad de tratamiento: [ton/día]

Porcentaje de residuos aprovechables: [%] D

Porcentaje de residuos transformados: [%]

Nuevos empleos creados: [empleos]

Consumo energético: [MWh/año]
 [MW]
 [MWh/año]

Energía eléctrica generada: [MWh/año]
 [MW]
 [MWh/año]

Costo de inversión: [USD]

Costo de operación: [USD/año]

Costo de mantenimiento: [USD/año]

Costo del pretratamiento: [USD/año]

Costo del post-tratamiento: [USD/año]

Costo por consumo energético: [USD/año]

Costo por disposición de residuos del tratamiento: [USD/ton]

Cuota del tratamiento: [USD/ton]

Las emisiones de CO2 equivalente deben calcularse por los gases emitidos.

Volumen de emisiones al aire: m3/h

Gases emitidos:	GWP	Emisiones
<input type="text"/>	GWP	<input type="text"/> mg/m3
<input type="text"/>	GWP	<input type="text"/> mg/m3
<input type="text"/>	GWP	<input type="text"/> mg/m3
<input type="text"/>	GWP	<input type="text"/> mg/m3
<input type="text"/>	GWP	<input type="text"/> mg/m3
<input type="text"/>	GWP	<input type="text"/> mg/m3

Emisiones de CO2:

Flexibilidad para una futura expansión.
 Flexibilidad para el cambio de las características de los residuos de ingreso.

FIGURA 13. VENTANA DE CAPTURA DE LA INFORMACIÓN RELATIVA AL PROYECTO.

Herramienta de evaluación

Nuevo Proyecto | **Datos por Localidad** | **Comparar Proyectos**

Busqueda por:

Número de proyecto:
 Año de inicio:
 Nombre del proyecto:
 Empresa:
 Tipo de tratamiento:
 Entidad Federativa:
 Descripción del proyecto:
Municipio:

Buscar

Año	Proyecto	Nombre	Tipo	Descripción	Empresa	Entidad	Municipio
2012	1	Proyecto uno	Gasificación	Gasificación convencional	AlterNRG	Distrito Federal	Iztapalapa
2012	2	Proyecto dos	Gasificación	Gasificación convencional	AlterNRG	Distrito Federal	Iztapalapa
2012	3	Proyecto tres	Gasificación	Gasificación Convencional	ENERGOS	Distrito Federal	Xochimilco
2012	4	Thermostelect	Gasificación	Gasificación convencional de RS	Thermostelect	Distrito Federal	Iztapalapa
2012	5	Plasco Energy Group	Gasificación	Gasificación convencional de RS	Plasco Energy Group	Distrito Federal	Iztapalapa
2012	6	Proyecto Doble	Gasificación	Gasificación convencional para F	Nueva	Distrito Federal	Iztapalapa

Seleccionar

FIGURA 14. RESULTADOS DE LA BÚSQUEDA DE PROYECTOS.

E.2.3 Modificar los datos de un proyecto existente.

Si lo que se requiere es modificar los datos de un proyecto previamente capturado, primeramente, se debe buscar el proyecto en la pantalla principal de la herramienta, de la forma ya mencionada. En la lista de proyectos que se despliega con los resultados de la búsqueda se selecciona el proyecto deseado y se presiona el botón “Seleccionar”. Así se muestra en la FIGURA 14.

A continuación se abrirá la ventana de los datos del proyecto, como la mostrada en la FIGURA 13. Esta ventana aparecerá llena con los datos del proyecto guardados anteriormente. Si se desea cambiar cualquiera de los datos, se debe presionar el botón “Editar”, con esto se habilitarán las casillas para modificar los datos.

Una vez modificados, se procede con el guardado de estos nuevos datos. La herramienta preguntará si desea sobrescribir los datos anteriores con los nuevos, se debe presionar el botón “Sí”. Las modificaciones se guardarán en la base de datos.

E.3 Resultados de la evaluación.

E.3.1 Obtención de los resultados de la evaluación.

Para continuar con la evaluación de la tecnología, una vez en la ventana de *Datos del proyecto*, se presiona el botón “Continuar”. Enseguida, la herramienta realiza los cálculos necesarios para obtener los valores de los indicadores de este estudio.

Los resultados son mostrados en la siguiente ventana de *Resultados*. Esta ventana se muestra en la FIGURA 16. En esta ventana se muestran los valores de los indicadores calculados para la tecnología en estudio en la localidad seleccionada. Los valores se presentan tanto de manera numérica como de manera gráfica. En las gráficas de los resultados, se muestran los resultados para el proyecto junto con los valores de referencia para poder visualizar de una forma más sencilla las diferencias entre estas dos.

De igual manera, en esta ventana, se pueden mostrar los valores de referencia utilizados para la comparación. Estos se muestran de manera numérica al presionar el botón “Valores de referencia”. Al presionar este botón, se muestran y se ocultan estos valores, permitiendo observar estos datos junto con los del proyecto, como se muestra en la FIGURA 17.

E.3.2 Comparación de proyectos.

La herramienta también permite realizar una comparación de los resultados de hasta cuatro tecnologías junto con los valores de referencia. Esto se puede realizar en la ventana de *Comparación de proyectos*, la cual se logra presionando el botón “Comparar” que se encuentra tanto en la pantalla principal, como en la ventana *Resultados*. Esta ventana para comparación se muestra en la FIGURA 15.

En esta ventana es necesario seleccionar la entidad federativa en la que se encuentran los proyectos que se desean comparar. Cabe resaltar que no es posible comparar tecnologías propuestas para distintas entidades federativas o municipios. Al seleccionar la entidad, se muestran en la lista los proyectos que cumplen con esta condición. Así, se pueden seleccionar

hasta cuatro proyectos. Una vez seleccionados los proyectos a comparar, se presiona el botón “Comparar”. Al presionar este botón, se muestran los resultados de los indicadores para los proyectos seleccionados. Los resultados numéricos se muestran en la tabla localizada en la parte inferior izquierda, mientras que las gráficas de resultados se ubican en la parte lateral derecha de la ventana. Así se muestra en la FIGURA 18.

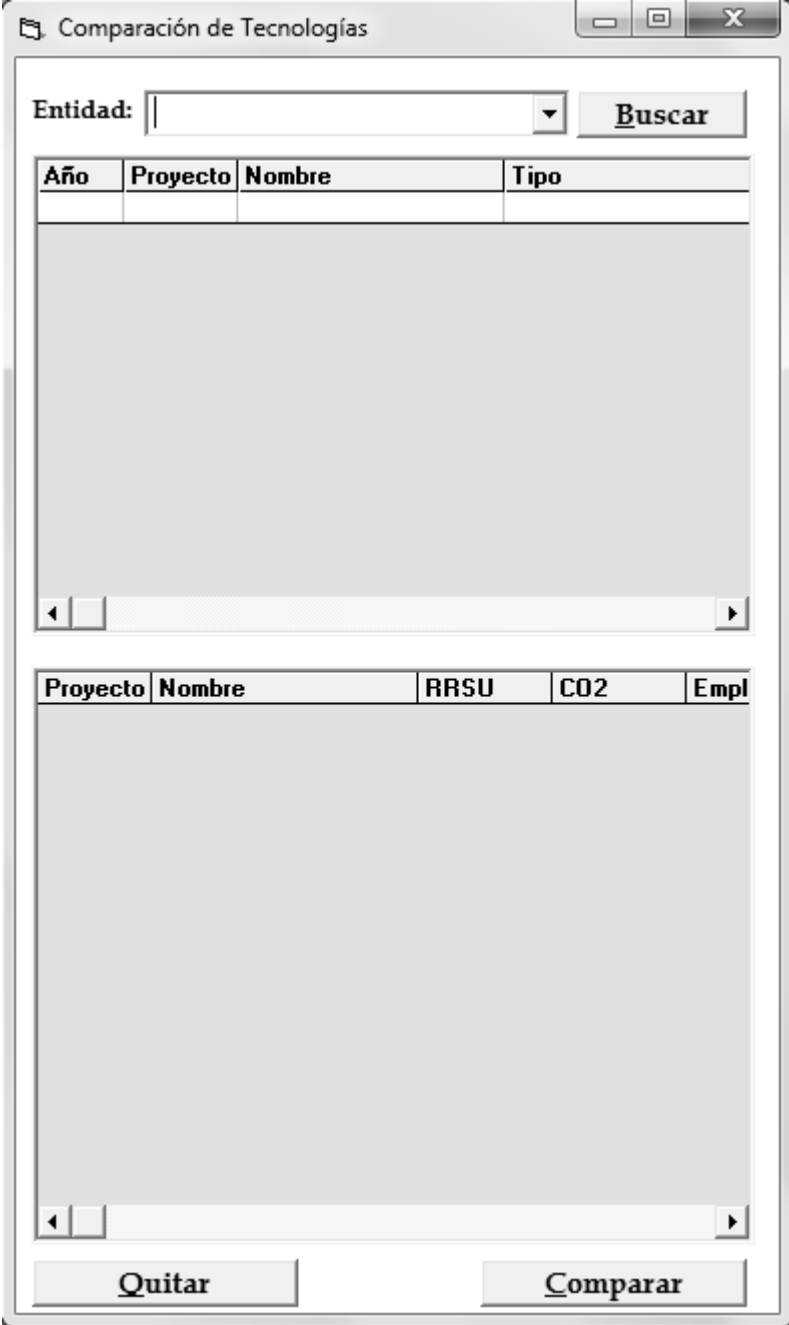


FIGURA 15. VENTANA DE COMPARACIÓN DE PROYECTOS.

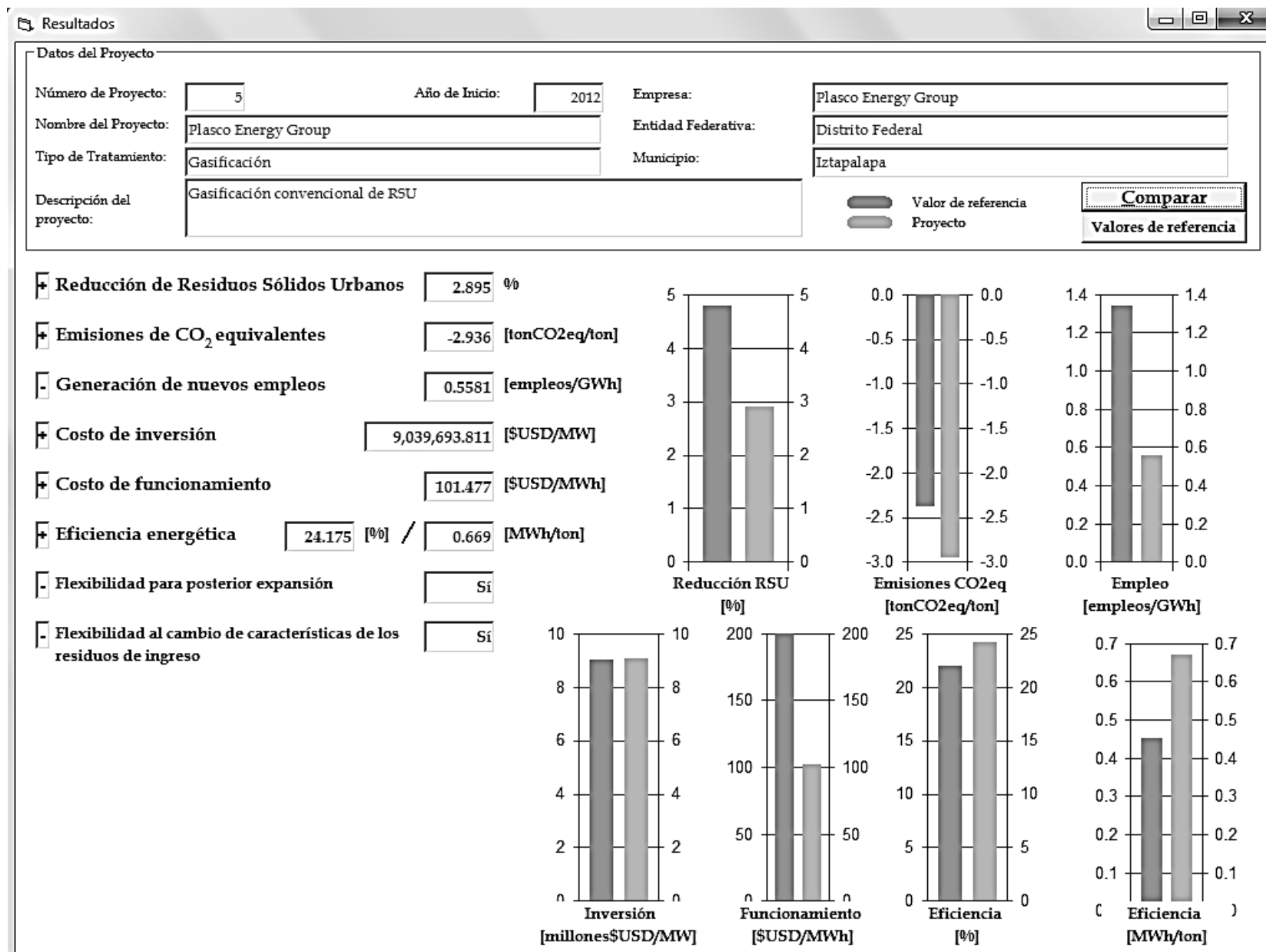


FIGURA 16. VENTANA DE RESULTADOS.

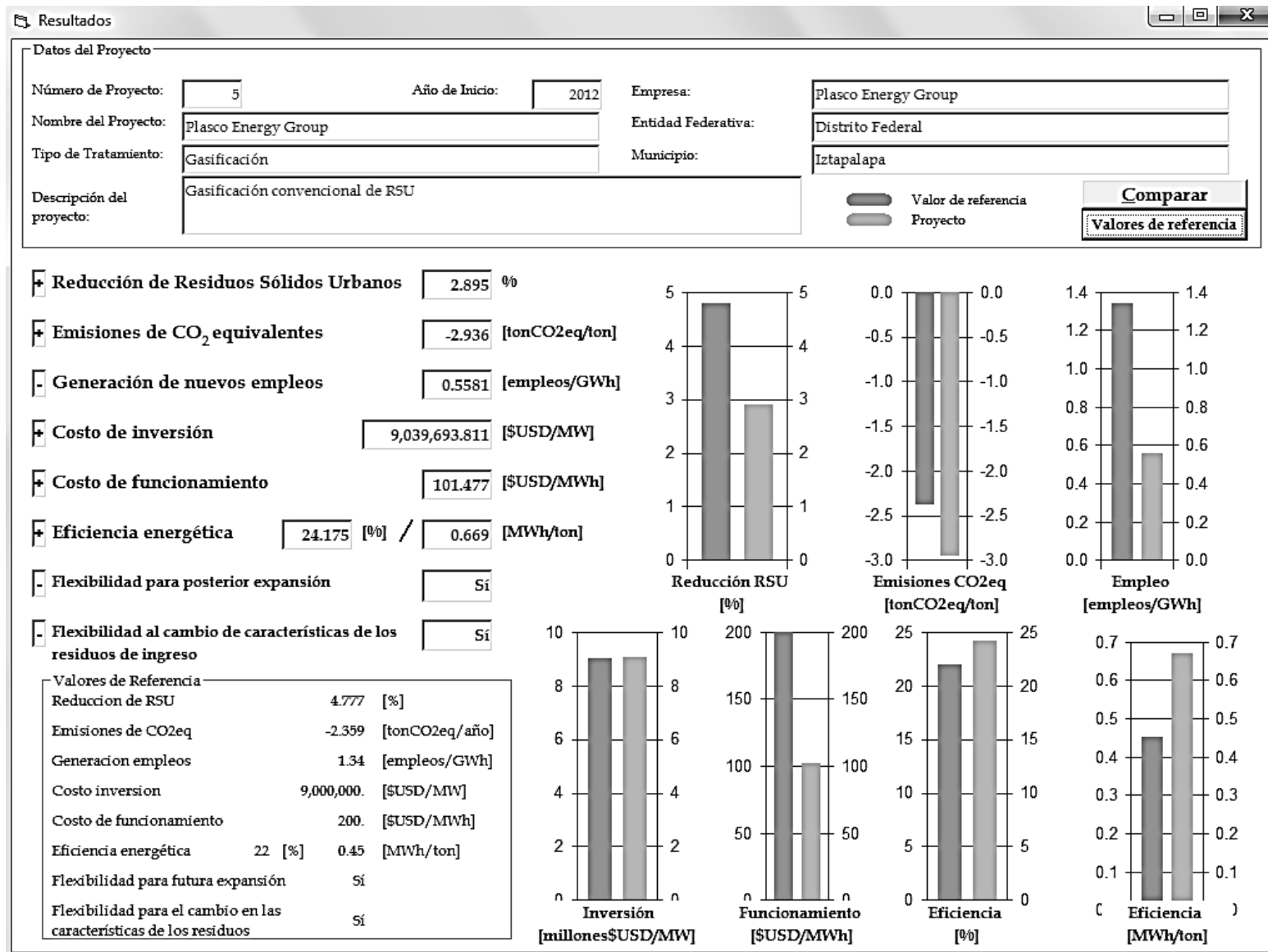


FIGURA 17. VENTANA DE RESULTADOS CON VALORES DE REFERENCIA.

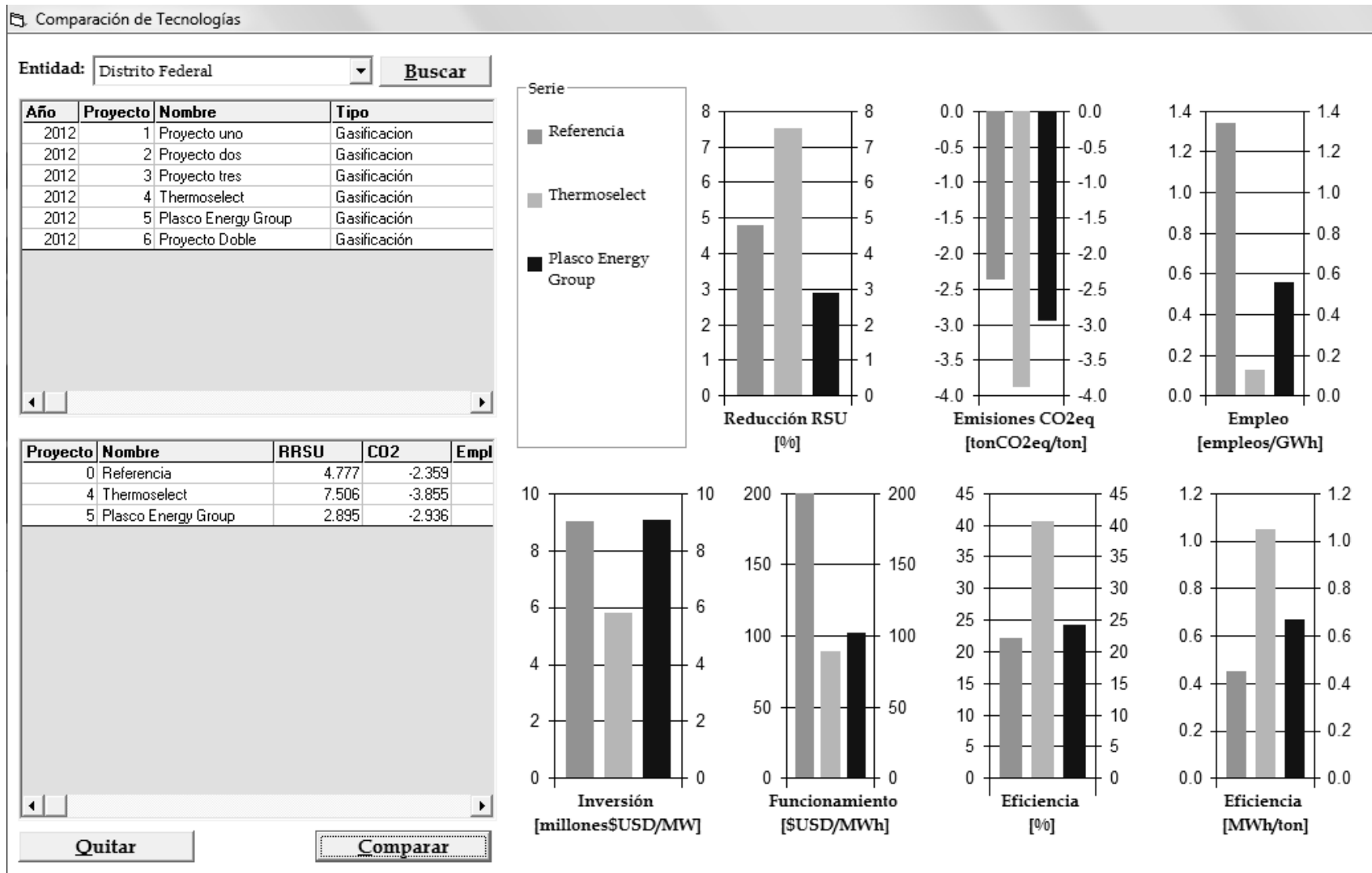


FIGURA 18. RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DE PROYECTOS.

ANEXO F. PROPUESTAS DE PROYECTOS PARA EL CASO DE ESTUDIO.

F1. Thermoselect.

Los datos utilizados para el caso de estudio del proyecto Thermoselect fueron tomados de los siguientes documentos.



AN OVERVIEW OF THE HISTORY AND CAPABILITIES OF THE THERMOSELECT TECHNOLOGY

Presented By
Frank Campbell, President
November 12, 2008

Obtenido el 14 de septiembre de 2010 de: <http://www.swananys.org/pdf/Thermoselect.pdf>

**PRODUCES 100% RECYCLED MATERIAL
100% Diversion Rate**

<u>Input</u>	<u>Pounds</u>	<u>Products</u>	<u>Pounds</u>
Waste	2,000	Synthesis Gas	1,767
Oxygen	994	Water	752
Consumables	128	Aggregate	489
NaOH		Metal Pellets	64
HCL		Sulfur	20
Ion Exchange Resin		Salt	17
Hydrogen Peroxide		Zinc Concentrate	13
Iron Chelate			
Total	3,122	Total	3,122



SYNGAS TO ELECTRICITY

- Environmental Performance
 - Air emissions meet southern California BACT for CTCC system firing natural gas
 - NO_x-2 ppmvd; CO-0.8ppmvd; SO₂- 0.1ppmvd; VOC-0.4ppmvd; PM-0.05 mg/m³
 - California SB 1368 – 1,100# CO₂/Mwh limit
 - IWT CTCC – 399# CO₂/Mwh
 - 36% of limit



WASTE PROCESSING CAPABILITIES

Item	Metric	British
Module Capacity	10.8 Mg/hr	11.88 t/hr
No. of Modules	4	4
Availability	85.6%	85.6%
Annual Throughput	324,000 Mg/y	356,400 t/y
Syngas - Volume	48,293 M ³ /hr	1,695,084 ft ³ /hr
Syngas - Heat Content	2.51 kwh/M ³	244 Btu/ft ³
Cold Gas Efficiency	59%	59%



16

POWER GENERATION (GE Frame 6B)

Item	Value
Syngas - Energy	121,016 kw/hr 412,906,592 Btu/hr
Thermal Conversion Efficiency	51.1%
Net Power Generation	61,796 kw
In-house Usage	16,608 kw
Net Power Generation	45,188 kw



17

ECONOMICS OF IWT SYSTEM

(Not Project Specific)

- Standard Plant Design – 396 tpd (360 Mg/d)
- 4 Module Facility – 1,584 tpd capacity
- Cost of Thermoselect equipment - \$285 million*
- \$180,000 per ton of daily capacity*
- Cost of Power Plant - \$80 million*
- \$50,000 per ton of daily capacity*
- \$230,000 per ton of daily capacity*

* Size of power plant, site conditions, site purchase, labor rates, sales tax



19

OPERATION & MAINTENANCE COST

- Labor
- Chemicals
- Natural Gas
- Maintenance Repair & Replacement
- Water
- Site & Overhead Expenses
- Sales & Property Tax ???
- Insurance
- Approximate Cost - \$70 to \$80/ton



20

F2. Plasco Energy Group.

Los datos utilizados para el caso de estudio del proyecto Plasco Energy Group fueron tomados de los siguientes documentos.



PLASCO TRAIL ROAD FACILITY ENVIRONMENTAL SCREENING REPORT

Prepared For:

Plasco Energy Group Inc.

Prepared By:

SENES Consultants Limited

June 2011

Obtenido el 11 de Agosto de 2010 de:

<http://www.zerowasteottawa.com/docs/Plasco%20350140%20REV%20ESR%20Final%2029June2011.pdf>

Efficient at a Small Scale

- 100 tonne per day modules
- Optimal plant size 3 module or more
- Reduce trucking
- Process waste where it is generated
- Locally distributed power supply



But Can We Afford It?

	Proposed Covanta Incinerator (Durham Region)	Proposed Plasco Facility
Capacity	140,000 TPY	140,000 TPY
Tip Fee	\$110 per tonne	\$70 – 80 per tonne
Power per Tonne	767 kWh per tonne	960 kWh per tonne
Capital Cost to Community	\$272,000,000	\$0 (Paid by tipping fee and power sales)



And the Alternative?

	Wind Power	Plasco Power
Power Price	\$ 0.135 per kWh + transmission costs	??
Transmission Load	High Variable	Reduction – Inside local distribution grid
GHG per Mwh	0 CO2e	-1.5 Tonnes CO2e (assumes 0% LFG Capture)



Plasco's Emission Profile

Parameter	Units	A7 Guidelines (Ontario)	PTR Regulation (Ontario)	Plasco Flare ¹	Plasco Engine ¹
Particulate Matter	mg/Rm ³	17	12	3.45	2.74
Organic Matter	NMHC - mg/Rm ³	-	-	-	5.90 ²
	CH4 - mg/Rm ³	-	-	-	146.04
	TOC - mg/Rm ³	66	49	0.14	153.58
Hydrogen Chloride	mg/Rm ³	27	19	0.75	1.25
Sulfur Dioxide	mg/Rm ³	55	37	30	22
NOx	mg/Rm ³	207	207	134	≤100
Carbon Monoxide	mg/Rm ³	-	-	0.60	26
Mercury	µg/Rm ³	20	20	0.2	3.3
Cadmium	µg/Rm ³	14	14	0.1	0.1
Lead	µg/Rm ³	142	142	3.1	0.7
Dioxans and Furans	ngTEQ/Rm ³	0.08	0.04	0.016	0.010

All values are expressed at 11% O₂ and reference conditions (101.3 kPa, 25°C)

1. CEMS and Source Testing done by Plasco – Not approved by MOE
2. Proposed Ontario Engine Regulation for NMOC 1.3 kg/MWh, Plasco source test 0.04 kg/MWh
3. With SCR, NOx levels less than 100 mg/Rm³



Plasco's Proposal

Communities Provide:

- A suitable site
- A supply of waste
- Support for permitting and power contract negotiations

Plasco Provides:

- Maximum value recovery of residual MSW
- > 98% diversion, preserving or extending the life of local landfills
- Cleantech employment opportunities; >50 full time jobs
- Clean, baseload power fed to local grid
- Budgetary certainty; competitive and predictable tipping fees for 20 years
- Improved local air quality
- Reduction of greenhouse gas emissions, reducing a community's carbon footprint

No capital cost, no operational cost; Plasco is responsible for financing, not the municipality.

