



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

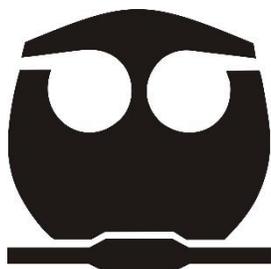
TESIS

**INCINERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN
MÉXICO: ANÁLISIS DE ASPECTOS TÉCNICOS,
AMBIENTALES Y LEGALES**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

EDUARDO REYNOSO CESAREO



MÉXICO, D.F. 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M.I. JOSE ÁNTONIO ORTIZ RAMIREZ

VOCAL: DRA. IRMA CRUZ GAVILAN GARCÍA

SECRETARIO: DR. ALFONSO DURÁN MORENO

1er. SUPLENTE: M.A.I. LANDY IRENE RAMÍREZ BURGOS

2° SUPLENTE: DR. JOSÉ AGUSTIN GARCÍA REYNOSO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: UNIDAD DE PROYECTOS Y DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL, TORRE DE INGENIERÍA, 3ER PISO, ALA SUR, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

DR. ALFONSO DURÁN MORENO

SUPERVISOR TÉCNICO:

I.Q. CARLOS IBARRA AGUILAR

SUSTENTANTE:

EDUARDO REYNOSO CESAREO

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivo	3
1.4 Alcances.....	3
1.5 Justificación.....	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Política ambiental mexicana.....	5
2.2 Residuos peligrosos	8
2.2.1 Definición	8
2.2.2 Clasificación.....	9
2.2.3 Manejo	9
2.2.4 Tratamiento y disposición	12
2.3 Incineración de residuos peligrosos	15
2.3.1 Tecnologías de incineración	18
2.3.2 Alimentación de residuos	19
2.3.3 Combustión.....	20
2.3.4 Recuperación energética	21
2.3.5 Depuración de gases	23
2.3.6 Monitoreo de emisiones	26
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	28

CAPÍTULO 4. DESARROLLO Y RESULTADOS	30
4.1 Situación Nacional de los RP	30
4.1.1 Generación Nacional	30
4.1.2 Manejo y Tratamiento Nacional	35
4.1.3 Estimación de RP susceptibles a la incineración	40
4.2 El proceso de Incineración	43
4.2.1 Establecimiento de variables críticas del proceso.....	44
4.2.2 Beneficios asociados a la incineración	46
4.3 Regulación de la Incineración de RP	47
4.3.1 Trámites y permisos aplicables a los proyectos de incineración.....	54
4.3.2 Áreas de oportunidad.....	59
4.4 Ejemplo de un caso de estudio exitoso	61
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
5.1 Aspectos técnicos a resolver.....	68
5.2 Aspectos ambientales a resolver.....	71
5.3 Aspectos legales a resolver.....	72
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	74
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA	77

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Generación de residuos peligrosos proveniente de empresas generadoras reportadas ante la SEMARNAT (SEMARNAT, 2010 b), (González Hernández, 2012), (INECC, 2012), (SEMARNAT, 2013).	31
Gráfica 2. Generación de residuos peligrosos provenientes de grandes, pequeños y micro generadores correspondientes a los años 2004-2013 (SEMARNAT, 2013).....	32
Gráfica 3. Generación de residuos peligrosos por región en el periodo del 2004 a 2013 (SEMARNAT, 2013)	34
Gráfica 4. Capacidad instalada de tratamiento de residuos peligrosos para el año 2014 (Elaboración propia con datos de (SEMARNAT, 2014)).....	37
Gráfica 5. Residuos susceptibles de incineración (elaboración propia).....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de residuos peligrosos (SEMARNAT, 2010 b).....	9
Tabla 2. Proceso Integral de Incineración (Unión Europea, 2011 a).	15
Tabla 3. Costos de tecnologías de tratamiento térmico en dólares (Young, 2010).	17
Tabla 4. Intervalos típico de aplicación de diferentes tecnologías de incineración (European Commission, 2014):.....	18
Tabla 5. Entradas y Salidas en tecnologías Waste to Energy (Tabasova, et al., 2012).	22
Tabla 6. Generación de residuos peligrosos por sector industrial (SEMARNAT, 2013).	32
Tabla 7. Generación de residuos peligrosos por tipo entre los años 2004-2013 (SEMARNAT, 2013).	33
Tabla 8. Infraestructura instalada para el manejo de RP (INEGI, 2012).....	38
Tabla 9. Intervalos y poder caloríficos netos típicos para residuos industriales y peligrosos de entrada en incineradoras (Unión Europea, 2011 a).....	40
Tabla 10. Residuos susceptibles de incineración (SEMARNAT, 2013).....	41
Tabla 11. Proyección de datos (Elaboración Propia).....	42
Tabla 12. Límite de emisión de contaminantes a la atmósfera (NOM-098-SEMARNAT-2002).....	53
Tabla 13. Parámetros de operación de la planta de Taizhóu, China (Ma, et al., 2011).	62
Tabla 14. Caracterización de residuos incinerados en Taizhóu, China (Ma, et al., 2011).	63
Tabla 15. Niveles de contaminantes en las emisiones de la planta (Ma, et al., 2011).....	64
Tabla 16. Acciones por atender para implementar la Incineración limpia de RP en México (Elaboración propia)	67
Tabla 17. Caracterización de residuos peligrosos	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Jerarquía de gestión de residuos (Demirbas, 2011).....	10
Figura 2. Metodología general.....	28
Figura 3. Generación de residuos peligrosos por región en el periodo del 2004 a 2013 (SEMARNAT, 2013).	35
Figura 4. Diagrama general del proceso de incineración.....	43
Figura 5. Jerarquización de la legislación nacional aplicable a la incineración de Residuos Peligrosos (Elaboración propia).....	48
Figura 6. Guía de Trámites para la implementación de la incineración	55
Figura 7. Diagrama esquemático de la Planta de Incineración (Ma, et al., 2011).....	61
Figura 8. Acciones de Implementación del proceso de incineración	66
Figura 9. Gantt para realizar los trámites de implementación del proceso de incineración limpia en México	73

RESUMEN

La tesis tiene por objeto presentar una guía para la conceptualización de proyectos de incineración de residuos peligrosos, como alternativa de disposición final y de aprovechamiento de residuos peligrosos, considerando aspectos técnicos, ambientales y legales, con el fin de minimizar el impacto ambiental que este tipo de prácticas representan al equilibrio ecológico, así como para contribuir al desarrollo nacional sustentable.

El desarrollo de este trabajo incluye una revisión del proceso de incineración, con la cual se determinó una lista de variables críticas para la operación de cada una de las etapas que integran un sistema de incineración, con el objetivo de crear una base técnica que permita un desarrollo tecnológico más eficiente. De igual manera se presenta la revisión de las tecnologías de incineración de residuos peligrosos existentes, mostrando las principales características técnicas de cada una.

El presente trabajo también comprende la revisión de la legislación ambiental mexicana, para identificar las bases constitucionales en materia ecológica para el manejo y la incineración de residuos peligrosos, así como los convenios firmados por México, las leyes que se han promulgado en la materia, y las normas aplicables al proceso de incineración; todo esto con el fin de identificar los requisitos y procedimientos para la implementación de este tipo de prácticas.

Finalmente, se determinó la situación actual del manejo de los residuos peligrosos en México, que comprende un análisis de la generación de residuos peligrosos reportado por la SEMARNAT, las fuentes generadoras y la clasificación según el tipo de residuo. Con estos datos se podrá tener un análisis de la infraestructura instalada en el país para tratar y disponer de estos materiales, con respecto a la cantidad de residuos generada.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos peligrosos es una consecuencia del crecimiento económico de un Estado, y además es impulsada por el rezago de la infraestructura industrial, y ocurre en mayor magnitud dentro de países en vías de desarrollo, como lo es el caso de México. La secuela de esta generación, se refleja en que el país debe manejar estos residuos peligrosos por medio de tecnologías disponibles para minimizar la cantidad generada, así como cualquier efecto negativo en el ambiente y la salud pública.

1.1 ANTECEDENTES

La producción de residuos peligrosos en México es generada por una amplia gama de actividades industriales, por lo que los niveles de riesgo asociados a su presencia en el medio ambiente son de una naturaleza muy diversa y se asocian a sus características: corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico infecciosas. Estadísticas de la SEMARNAT reportan una generación de poco más de 2 millones de toneladas de residuos peligrosos entre los años 2004 y 2013.

En la actualidad, el manejo de los residuos peligrosos incluye los procesos de reciclaje, recolección, almacenamiento, transporte y disposición. Algunas de las alternativas comúnmente utilizadas para la disposición de residuos peligrosos, son el reciclaje, la destrucción y el confinamiento. El reciclaje comprende el aprovechamiento de estos materiales en procesos productivos específicos, dándoles un carácter de materia prima; para la destrucción por incineración de los residuos peligrosos, las cenizas generadas pueden ser confinadas de una manera más práctica y finalmente el confinamiento de los residuos peligrosos, es el proceso que incluye la detoxificación, concentrando los residuos en volúmenes reducidos y estabilizados para evitar la generación de lixiviados. La incineración es un método de tratamiento de residuos peligrosos, con la ventaja de reducir las características de peligrosidad y al mismo tiempo reducir el volumen de los mismos.

El crecimiento industrial ha acelerado la acumulación de residuos que dañan al ambiente y a la salud humana, por lo que se ha propiciado la generación de disposiciones regulatorias donde

se establecen pautas de conducta y medidas a seguir para conseguir un manejo seguro de este tipo de materiales a fin de prevenir riesgos y evitar la disposición en tiraderos clandestinos. La contaminación de cuerpos de agua (principalmente aguas subterráneas) a través de los residuos peligrosos, causada por la disposición inadecuada de los mismos, hizo que México, diera una alta prioridad a su manejo (PROFEPA, 2010).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo industrial de una nación es de vital importancia porque de él depende la economía de un Estado y en consecuencia la calidad de vida de sus habitantes. En México se estima que cada año se registran como generadoras de residuos peligrosos aproximadamente 10 mil empresas nuevas (SEMARNAT, 2010 b) , además tomando como referencia el periodo comprendido del 2009 al 2013, en promedio se generan más de 86 mil toneladas de residuos peligrosos al año (INECC, 2012). Es relevante señalar que en el año 2012 se generaron más de 14 mil toneladas pero para el año 2013 la generación estimada ya fue de más de 98 mil toneladas, lo que representa un aumento del 700%.

Se puede aserir que a medida que la actividad industrial aumenta, la generación de residuos peligrosos va creciendo, de tal manera que el impacto y el riesgo que ocasionan su manejo, tratamiento y disposición final representan en la actualidad y de manera ulterior, una preocupación de las autoridades competentes en materia ambiental, así como de los generadores de este tipo de materiales. Por lo que es necesario desarrollar bases documentales que permitan aumentar y diversificar la infraestructura para el manejo sustentable de este tipo de materiales.

La incineración es una alternativa de tratamiento para la destrucción de estos residuos, México cuenta con una capacidad instalada de 47 mil toneladas (SEMARNAT, 2014) para esta práctica lo que se traduce en una capacidad insuficiente, que en comparación con el confinamiento en vertederos controlados es 90% menor. Esto aunado a la poca información disponible sobre generación e incineración de residuos peligrosos en nuestro país, representa un área de oportunidad para la gestión integral de este tipo de residuos.

1.3 OBJETIVO

Analizar conceptualmente los aspectos técnicos, ambientales y legales que deben considerarse para la formulación de proyectos de incineración de residuos peligrosos en México. En el análisis técnico y ambiental se incluirá la revisión de bibliografía especializada y de información disponible de los procesos más utilizados a nivel internacional y que tengan las características para poder implementarse en México. En el análisis legal se revisará el marco jurídico en México en materia ambiental para identificar los requerimientos que deberán cumplirse para la incineración de residuos peligrosos.

1.4 ALCANCES

- Identificar las variables críticas de cada etapa del proceso para desarrollar la base técnica del trabajo
- Determinar el estado actual de la generación, manejo y disposición de RP recopilando información estadística disponible.
- Analizar la política ambiental aplicable al proceso de incineración mediante la identificación de áreas por atender para generar una base documental legal.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Algunos de los materiales que se generan en la industria pueden poseer características que les confieren la incapacidad de seguirlos tratando con subprocesos que permitan reciclarlos o convertirlos en materia prima de otros procesos específicos. Estos materiales tienen dos opciones de disposición final, se envían a confinamiento o se destruyen mediante incineración u otro proceso térmico.

Dependiendo del tipo de residuos y del proceso que los generó, existen alternativas de tratamiento para los residuos peligrosos, algunos con mayor madurez tecnológica que otros, pero aun así con sus propias limitantes. Las tecnologías de incineración con recuperación de energía son la única opción para algunos materiales con valor energético que no cuentan con la capacidad de poder ser reincorporados a otros procesos.

La incineración es un proceso comúnmente utilizado para destruir residuos peligrosos en países industrializados como lo son los Estados Unidos (RCRA, 1999), por lo que este trabajo busca promover el crecimiento sustentable de la industria de incineración de residuos peligrosos, planteando los aspectos fundamentales que se deben de cumplir en la implementación de estas instalaciones.

En la actualidad en México, se ofertan diversas tecnologías para el procesamiento de residuos peligrosos, entre las que destacan la incineración y la gasificación, que ofrecen muchos beneficios, pero que en algunos de los casos se encuentran todavía en fase piloto. Estas tecnologías han sido implementadas a escala industrial en otros países como es el caso de la ciudad de Taizu y Shangai (METSU, 2014) en China, un país en vías de desarrollo (World Bank Group, 2014), obteniendo beneficios monetarios por la valorización energética.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

La implementación de la incineración como alternativa de tratamiento para los residuos peligrosos, es una tarea que integra aspectos técnicos, ambientales y legales, esto con el objetivo de llevarse a término con éxito un proyecto de esta índole, el alcance de este trabajo no incluye un análisis económico.

2.1 POLÍTICA AMBIENTAL MEXICANA

La Constitución Política es la base de las leyes de carácter general o federal. Estas a su vez, se regulan a través de uno o varios reglamentos para su aplicación en la práctica. Finalmente, los reglamentos pueden o no requerir normas que son específicas para un grupo de personas limitados con el mismo interés.

La cabeza del sector en materia ambiental y ecología es la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la cual, entre sus funciones están las de fomentar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales, así como los bienes y servicios ambientales con el fin de propiciar su aprovechamiento y desarrollo sustentable. Así como también es la encargada de formular y conducir la política nacional en materia de recursos naturales, preservar y restaurar el ambiente, administrar y regular el uso así como promover el aprovechamiento sustentable de los recursos.

Por la jurisdicción asignada, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) así como la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) son instancias ambientales importantes en nuestro país (González Hernández, 2012).

El INECC es un organismo público descentralizado de la Administración Pública Federal, con personalidad jurídica, patrimonio propio y autonomía de gestión, sectorizado en la SEMARNAT, cuenta con atribuciones previstas en la Ley General de Cambio Climático, las cuales son coordinar, promover y desarrollar, con la participación que corresponda a otras dependencias y entidades, la investigación científica y tecnológica relacionada con la política nacional en

materia de bioseguridad, desarrollo sustentable, protección del medio ambiente, preservación y restauración del equilibrio ecológico y conservación de los ecosistemas y cambio climático.

Por su parte la PROFEPA es un órgano administrativo desconcentrado, con autonomía técnica y operativa. Una de las tareas principales de la PROFEPA es incrementar los niveles de observancia de la normatividad ambiental a fin de contribuir al desarrollo sustentable. Entre sus atribuciones se encuentran vigilar el cumplimiento de las disposiciones legales; salvaguardar los intereses de la población en materia ambiental procurando el cumplimiento de la legislación ambiental, sancionar a las personas físicas y morales que violen dichos preceptos legales, por mencionar algunos ejemplos (PROFEPA, 2014).

La política ambiental es el conjunto de acciones y técnicas con lo que los diferentes niveles de organización del Estado y organizaciones no gubernamentales buscan el cuidado del medio ambiente y la conservación de la naturaleza, éstas son adoptadas y aprobadas por los gobiernos suscriptores de los acuerdos internacionales. Las políticas se ponen en marcha mediante una amplia variedad de instrumentos¹.

El panorama de la política nacional sobre medio ambiente ha evolucionado de una forma lineal y sectorial para proporcionar servicios específicos a corto o mediano plazo, con frecuencia en función de los ciclos electorales. Este tipo de respuesta no es siempre el más adecuado para hacer frente a los problemas complejos y multisectoriales que plantea el desarrollo sustentable, cuyo horizonte temporal abarca varias generaciones y requiere un compromiso constante que va más allá de los 6 años de un período gubernamental. El desarrollo sustentable requiere un triple enfoque centrado en el ambiente, la economía y la sociedad, lo que va en contra del modo tradicional de formular y desarrollar políticas (Valderrábano Almegua, et al., 2012).

¹ Un instrumento de política pública implica un conjunto de técnicas mediante las cuales las autoridades gubernamentales ejercen el poder en el intento de buscar un cambio social, una política reflexiva requiere la elección de los instrumentos adecuados. La política ambiental en la década de 1970 y principios de 1980 se estableció casi en su totalidad por el comando y control las normas de emisiones que abarca, la calidad, los procesos y requerimientos tecnológicos (Valderrábano Almegua, et al., 2012).

En México la política ambiental se establece jurídicamente con base en los principios contenidos en el Artículo 15 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente que dice:

“Para la formulación y conducción de la política ambiental y la expedición de normas oficiales mexicanas y demás instrumentos previstos en esta Ley, en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente, el Ejecutivo Federal observará los siguientes principios”:

- I. Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar;
- II. Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación;
- III. La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;
- IV. La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas;
- V. El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;
- VI. La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo;
- VII. Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente;
- VIII. El ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, bajo el principio de concurrencia previsto en el artículo 73 fracción XXIX - G de la Constitución;
- IX. El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en materia ambiental, y
- X. El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan.

2.2 RESIDUOS PELIGROSOS

Los residuos que genera una industria son el reflejo de las formas de producción y consumo de las sociedades en que vivimos, por lo cual su gestión debe adecuarse a los cambios que se producen en ambos procesos. (Anon., 2012).

2.2.1 DEFINICIÓN

En México, la LGEEPA (2012) y la LGPGIR (2003) definen a un residuo peligroso como aquél que posea alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contengan agentes infecciosos que le confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio y por tanto, representan un peligro al equilibrio ecológico o el ambiente.

Los Estados Unidos de Norteamérica, mediante la “*Resource Conservation and Recovery Act, Ley 94-580 del 21 de octubre de 1976*” (EPA, 1976), definen a un residuo peligroso como un residuo sólido, o una combinación de residuos sólidos que debido a su cantidad, concentración física o química, con características infecciosas que puedan; (a) causar significativamente un incremento en la mortalidad o un aumento grave irreversible, incapacitante reversible, o enfermedad, (b) plantea un presente sustancial o un peligro potencial a la salud humana y el medio ambiente cuando es tratado de forma inadecuada, almacenado, transportado, eliminado, o de otra manera manejado.

La Directiva 78/319 del 20 de marzo de 1978 de la Comisión Económica Europea (European Commission, 2014) define a un residuo tóxico y peligroso como aquellos desechos con contenido o contaminado por sustancias o materiales con propiedades peligrosas, en cantidades o concentraciones que puedan constituir un riesgo a la salud y al medio ambiente (El Anexo de dicha directiva enumera 27 sustancias y materiales que constituyen residuos peligrosos).

2.2.2 CLASIFICACIÓN

Los residuos peligrosos se generan de diversas actividades industriales desarrolladas en el país, por lo que su disposición varía dependiendo de la naturaleza que le confiera el proceso de procedencia. La clasificación de estos materiales depende de las actividades que los generan, la SEMARNAT contempla la clasificación de residuos peligrosos de la Tabla 1 con el fin de contar con un inventario de generación.

Tabla 1. Clasificación de residuos peligrosos (SEMARNAT, 2010 b).

Tipo de residuo	Residuos que comprende
Sólidos	Telas, pieles o asbesto; De mantenimiento automotriz; Con metales pesados; Tortas de filtrado; otros sólidos
Aceites gastados	Dieléctricos; Lubricantes; Hidráulicos; Solubles; Templado de Metales; Otros aceites
Otro	Sin descripción
Lodos	Aceitosos; Galvanoplastia; Proceso de pinturas; Templado de metales; Tratamiento de aguas de proceso; Tratamiento de aguas negras; Otros lodos
Biológico-Infecioso	Cultivos y cepas; Objetos punzocortantes; Patológicos; No anatómicos; Sangre
Escorias	Finas; Granuladas
Solventes	Orgánicos; Organoclorados
Lodos de Proceso	Corrosivos, No corrosivos
Sustancias Corrosivas	Ácidos; Alcalis
Breas	Catalíticas; Destilación; Otras breas

2.2.3 MANEJO

Existen grandes cantidades de residuos que no pueden ser eliminados, sin embargo el impacto ambiental derivado de estos puede ser reducido haciendo más sustentable el uso de dichos materiales. Esto es conocidos como la jerarquía de gestión de residuos (Demirbas, 2011). El objetivo de esta jerarquía es extraer los máximos beneficios prácticos de los productos para

generar la mínima cantidad de residuos. De acuerdo con esta jerarquía, el manejo moderno de residuos debe incluir:

- i) Eficiencia técnica en términos de protección ambiental
- ii) Eficiencia económica en términos de factibilidad de costos
- iii) Aceptación social.

Estos tres factores se encuentran alineados con el concepto de los pilares de sustentabilidad ambiental, económica y social (Kikuchi & Jacques, 2013). La elección de algún método de tratamiento depende de las propiedades físicas y químicas de los materiales así como de la disponibilidad de facilidades para procesar este tipo de residuos (Jordão da Silva, et al., 2012).

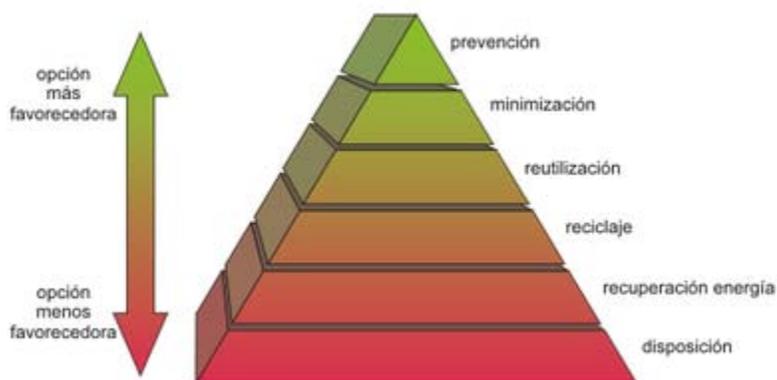


Figura 1. Jerarquía de gestión de residuos (Demirbas, 2011)

Los sistemas avanzados para la gestión de residuos, radican en estrategias de manejo prioritarias que promuevan la minimización de los problemas ambientales, así como la preservación de recursos. Dichas estrategias están caracterizadas dentro de seis áreas enlistadas en la jerarquización de gestión de los residuos (Demirbas, 2011), las áreas se enlistan en la Figura 1.

El sistema de manejo integral de residuos consiste en el conjunto de actividades formados por la colección, transporte, procesamiento, reciclaje o disposición así como el monitoreo de los materiales contenidos. Tiene como propósito promover las condiciones sanitarias para reducir la cantidad de estos materiales, así como promover su reutilización (SEMARNAT, 2014).

El proceso de industrialización en México, así como en otros países, se incrementó durante la segunda mitad del siglo XX, derivó de un aumento en la demanda del consumo de bienes y servicios para satisfacer una población en crecimiento, una de las consecuencias fue el incremento en la generación de residuos, tanto urbanos como industriales.

Como parte de la política ambiental del Gobierno Federal y con el compromiso de generar la información estadística necesaria para poder determinar las acciones necesarias que logren un manejo integral de los residuos producidos en el país, la Dirección General de Gestión de Materiales y Actividades Riesgosas de la SEMARNAT recopila y tiene a disposición los datos reportados por las empresas generadoras sobre la generación estimada de residuos peligrosos registradas en la Secretaría mediante los Trámites SEMARNAT-07-017-A. "Registro como generador de residuos peligrosos" y SEMARNAT-07-017-B "Registro para auto-determinar la categoría de generación de residuos peligrosos".

La Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas refiere 15 principales modalidades de manejo, las cuales se enlistan a continuación:

1. Reciclaje de Residuos Peligrosos Industriales
2. Aprovechamiento de Residuos Peligrosos Industriales
3. Co-procesamiento de Residuos Peligrosos Industriales
4. Reutilización de Residuos Peligrosos Industriales.
5. Tratamiento de Residuos Peligrosos Industriales.
6. Incineración de Residuos Peligrosos Industriales.
7. Confinamiento de Residuos Peligrosos Industriales.
8. Recolección y Transporte de Residuos Peligrosos.
9. Almacenamiento de Residuos Peligrosos.
10. Tratamiento de Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos In-situ.
11. Tratamiento de Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos Ex Situ.
12. Incineración de Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos.
13. Manejo de Residuos Peligrosos Bifenilos Policlorados.
14. Importación- Exportación de Residuos Peligrosos Bifenilos Policlorados.
15. Prestación de Servicios de Remediación de Suelos Contaminados.

El transporte y el acopio de los residuos peligrosos no se reporta debido a que se consideran como una fase del manejo en la cual sólo se transfieren, debido a que no se realiza ninguna transformación de los materiales. De igual manera la información recabada acerca de las modalidades de manejo de los Residuos Peligrosos Biológicos Infecciosos (RPBI) y los Bifenilos Policlorados (PBC), se debe analizar de forma independiente ya que cuentan con infraestructura específica para su manejo; lo mismo ocurre con los datos de las actividades de Importación, Exportación y la Remediación de suelos contaminados.

Dentro del marco de gestión de residuos de países desarrollados, las tecnologías “Waste to Energy” representan un camino hacia las fuentes de energía renovable para un desarrollo sustentable. Los residuos utilizados en lugar de los combustibles fósiles tienen un excelente potencial por su alto contenido energético (Kothari, et al., 2010).

2.2.4 TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN

Actualmente no existe en nuestro país una oferta diversificada de tecnologías para el tratamiento y disposición de residuos peligrosos, por lo cual es frecuente la búsqueda de nuevas alternativas. Debido a la existencia de diversos tratamientos y de disposición final de los residuos sólidos, su aplicación no es siempre la más adecuada en todos los casos, ya que la eficacia del sistema y la eficiencia de su proceso, depende de ciertas características geográficas, sociales y económicas, además de parámetros en composición de los residuos generados, actualmente en México se tiene una capacidad de 1.5 millones de toneladas para el confinamiento (SEMARNAT, 2014).

La LGPGIR define al tratamiento como el procedimiento mecánico, físico, químico, biológico o térmico, mediante el cual se cambian las características de los residuos sólidos y se reduce su volumen o peligrosidad. Los métodos y tecnologías son parte integral del manejo de los residuos sólidos. Con ellos se busca la recuperación de materiales, el reúso y la reincorporación a procesos productivos, así como la optimización de los requerimientos para el manejo y la disposición final de aquellos que no son reutilizables (UNAM, 2009).

Las opciones para disponer los residuos peligrosos en el país son:

Reciclaje y/o co-procesamiento: El reciclaje es la transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos y el co-procesamiento es la integración ambientalmente segura de los residuos generados por una industria o fuente conocida, como insumo a otro proceso productivo.

Tratamiento: La elección del tipo de tratamiento está muy relacionada con el tipo de residuo de que se trate y las posibilidades de reciclaje o de eliminación definitiva del residuo en cuestión. Existen varios tipos diferentes de tratamientos: físico-químico, biológico y/o térmico.

Incineración: Es un proceso basado en oxidación térmica que tiene como fin reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, en el cual todos los factores de combustión como la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, con el fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos.

Confinamiento: Los residuos peligrosos se destoxifican, se separan y concentran los componentes peligrosos en volúmenes reducidos y finalmente se estabilizan para evitar la generación de lixiviados.

Existen otras alternativas dentro de los procesos de tratamiento térmico, las cuales son la gasificación, gasificación por plasma y pirólisis. Sin embargo se consideran aún como tecnologías emergentes (Caneghem, et al., 2012).

La gasificación es un proceso de combustión parcial en donde un combustible se quema al propósito con una cantidad de aire menor al estequiométrico. Energéticamente es una técnica eficaz para reducir el volumen de los residuos sólidos con la posibilidad de recuperar energía. La combustión parcial de material carbonoso da como resultado un combustible rico en gases con alto contenido de monóxido de carbono, hidrógeno y algunos hidrocarburos saturados, entre ellos el metano. Dicho gas puede quemarse en un motor de combustión interna, turbina de gas o caldera con cantidades adicionales de oxígeno. Se ha reportado que cualquier mezcla de plásticos, estiércol, papel, residuos de jardín, escombros de construcción, muebles, residuos

peligrosos, residuos de cosecha, por mencionar algunos ejemplos, pueden ser convertidos en dicho gas, el cual sirve como materia prima en la producción de etanol (Young, 2010).

La pirólisis es un tratamiento térmico avanzado (Defra, 2013), que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno. Ambos sistemas se utilizan para convertir los residuos sólidos en combustibles gaseosos líquidos y sólidos. La principal diferencia consiste en que los sistemas de pirólisis utilizan una fuente de combustión externa para llevar a cabo las reacciones endotérmicas de pirólisis en un ambiente libre de oxígeno, mientras que la gasificación se realiza sin el aporte externo y usa aire u oxígeno para la combustión parcial de los residuos. Se obtienen tres factores de este proceso: una corriente gaseosa (H_2 , CH_4 , CO y otros gases), una fracción líquida (alquitrán o aceite conteniendo ácido acético, acetona, metanol e hidrocarburos oxigenados complejos) y coque inferior, que consiste de carbono y materia inerte presente en los residuos (UNAM, 2009).

2.3 INCINERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

El sector de la incineración ha presentado un rápido desarrollo tecnológico a nivel mundial en los últimos 10 a 15 años. Muchos de estos cambios se deben a la legislación específica para la industria y esto en particular ha reducido las emisiones a la atmósfera planteadas para este tipo de instalaciones individuales (EPA, 2009). La incineración es un proceso integral, la combustión de los residuos es sólo una etapa de un sistema complejo de tratamiento de este tipo de materiales.

El proceso generalmente comienza con la alimentación de los residuos, continúa con la combustión de los materiales, de manera subsecuente se encuentra la recuperación de energía de los gases de combustión finalizando con la limpieza de los gases contaminantes. La Tabla 2 muestra las etapas del proceso de incineración, así como los equipos responsables de cada una de ellas.

Tabla 2. Proceso Integral de Incineración (Unión Europea, 2011 a).

Objetivo	Responsabilidad
Destrucción de sustancias orgánicas	Horno
Evaporación de agua	
Evaporación de metales pesados y sales inorgánicas volátiles	
Producción de escorias potencialmente explotables	
Reducción de volumen de los residuos	
Recuperación de energía utilizable	Sistema de recuperación de energía
Remoción y concentración de metales pesados y materia inorgánica volátiles dentro de residuos sólidos, por ejemplo los residuos de la limpieza de los gases de combustión,	Sistema de limpieza de gases de combustión
Minimización de las emisiones a todos los medios	

El tratamiento térmico de los residuos peligrosos puede ser visto como una respuesta a las amenazas ambientales poseídas por un pobre o un mal manejo de los residuos. Sin embargo en el curso de la operación de instalaciones de incineración, surgen emisiones y consumos, de los cuales su existencia o magnitud es influenciada por el diseño de la instalación y la operación. Los impactos potenciales de las instalaciones de incineración de residuos caen dentro de las siguientes categorías

- Emisiones globales del proceso al aire y agua (incluyendo los olores)
- Producción global de residuos del proceso.
- Ruido y vibración del proceso
- Consumo y producción de energía
- Consumo de materia prima (reactivo)
- Fugas de emisiones, principalmente del almacenamiento de los residuos
- Reducción de los riesgos de almacenamiento, manipulación y procesamiento de los residuos peligrosos.
- Transporte de entrada y salida de residuos
- Pretratamiento extensivo de los residuos (por ejemplo, preparación de combustible alterno)

La aplicación y el cumplimiento de modernos estándares de emisión, y el uso de tecnologías modernas de contaminación, han reducido los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera, a tal grado que se ha reducido el riesgo a niveles bajos. El uso efectivo y su continuidad de dichas técnicas para controlar emisiones resulta ser una cuestión clave en el proceso de incineración de residuos.

Por otro lado, muchas instalaciones de incineración tienen un rol particular como un “proceso de recuperación de energía de los residuos”, lo que lo convierte en una contribución medioambiental positiva. El calor de la combustión de los residuos que ya no tienen una utilidad puede ser aprovechado para producir vapor, subproducto que en conjunto con turbinas es capaz de generar energía eléctrica. La Tabla 3 muestra una comparación de los costos de diferentes tecnologías en comparación con la incineración. Están elaboradas con base en la incineración de residuos sólidos urbanos.

Tabla 3. Costos de tecnologías de tratamiento térmico en dólares (Young, 2010).

Parámetro	Incineración	Pirólisis	Pirólisis/Gasificación	Gasificación Convencional	Gasificación por arco de plasma
Inversión de capital al 6% y 20 años.	\$115,997,700	\$86,936,900	\$102,593,400	\$80,337,800	\$101,583,800
Capacidad de la planta (ton RSU/día)	500	500	500	500	500
Producción energética (kWh/ton RSU)	544	571	685	685	816
Operación y mantenimiento, presupuesto de capital, costo de disposición de cenizas (40\$/ton) (\$/año)	\$8,216,600	\$7,193,700	\$7,711,100	\$6,871,800	\$7,483,400
Cuota de inflexión (\$/ton RSU) (ingreso)	\$35	\$35	\$35	\$35	\$35
Certificados de energía renovable (ingreso).	2 ¢/kWh	2 ¢/kWh	2 ¢/kWh	2 ¢/kWh	2 ¢/kWh
Venta de producción energética (ingreso).	6.5 ¢/kWh	6.5 ¢/kWh	6.5 ¢/kWh	6.5 ¢/kWh	6.5 ¢/kWh
Por Producto	0.2	0.21	0.2	0.2	0.2
Residuo (ton/ton RSU)	Ceniza	Ceniza/Carbón	Ceniza	Ceniza/ Escoria	Variedad de Escoria

2.3.1 TECNOLOGÍAS DE INCINERACIÓN

La incineración es una tecnología ampliamente utilizada en países desarrollados de Europa (Alemania, Inglaterra, Francia, España, por mencionar algunos), Estados Unidos, Canadá y Japón, siendo este último uno de los que mayor número de plantas tiene en operación (UNAM, 2009). La Tabla 4 muestra el intervalo típico de operación de diferentes tecnologías utilizadas para la incineración.

Tabla 4. Intervalos típico de aplicación de diferentes tecnologías de incineración (European Commission, 2014):

Tecnología	Intervalo típico de aplicación (ton/día)
Parrilla móvil	120-720
Lecho fluidizado	36-200
Horno rotatorio	10-350
Pirólisis	10-100
Gasificación	250-500
Nota: Los valores son de intervalos de aplicación típica, cada uno también puede aplicar fuera de los intervalos mostrados	

Los diseños de los incineradores son de diversos tipos, algunos de ellos se desarrollan para procesar residuos específicos, que principalmente dependen del estado físico que presentan. Muchos de estos diseños han sido utilizados desde hace varios años, dentro de los tipos más comunes se encuentran el horno de parrilla móvil, de lecho fluidizado, rotatorio y de solera múltiple.

- ✓ Horno de parrilla móvil

Este tipo de horno posee parrillas de incineración con una estructura en forma de rodillos móviles, encargados de mover y mezclar los residuos para favorecer el proceso de combustión.

El comburente utilizado es aire, que es inyectado a través de las gradas o rodillos, la velocidad de las parrillas móviles o los rodillos, así como el flujo de aire en diversas zonas puede ser ajustado con el fin de que el proceso de combustión de los residuos se lleve a cabo en condiciones óptimas.

✓ Horno de lecho fluidizado

El horno de lecho fluidizado es un recipiente de acero vertical, recubierto en su interior con material refractario; contiene un lecho de material granular como arena sílica, cal o un material cerámico el cual se mezcla con los residuos a incinerar mediante la inyección de aire. Debido a que se presenta un buen mezclado de la materia prima con el aire tiene una alta eficiencia térmica.

✓ Horno rotatorio

La tecnología de horno rotatorio consiste en una cámara cilíndrica recubierta en su interior con material refractario, tiene una disposición horizontal ligeramente inclinada y está equipado con un sistema de rotación. Debido a la inclinación y rotación, los residuos son transportados y volteados a lo largo de la cámara, lo que provoca una mezcla entre la materia prima y el aire primario que fluye a lo largo del eje del horno incrementando la eficiencia térmica del sistema. Los hornos rotatorios son cerrados, lo que implica que también pueden ser alimentados con residuos líquidos y viscosos.

✓ Horno de solera múltiple

El horno es una cámara que en el interior consta de varios niveles o pisos en los que los residuos son incinerados, el sistema cuenta con unos brazos móviles acoplados en un eje central que gira mezclando así los residuos con aire que fluye a contracorriente.

2.3.2 ALIMENTACIÓN DE RESIDUOS

Los residuos pueden ser aceptados en distintos tamaños y preparados específicamente para su incineración. Las técnicas apropiadas de triturado y extracción de metales, así como el mezclado homogéneo permite la creación de un material estandarizado, teniendo como

consecuencia la mejora de la combustión, la reducción de las cargas contaminantes, las fluctuaciones del poder calorífico, reducción de emisiones contaminantes y consumos energéticos por el funcionamiento más uniforme (Unión Europea, 2011 a). Además se sabe que se produce una generación de energía más uniforme. Este tipo de técnicas pueden ser particularmente aplicables

2.3.3 COMBUSTIÓN

La incineración es la oxidación del material combustible contenido en la basura. Las etapas del proceso se describen a continuación (Unión Europea, 2011 a):

- Secado y desgasificación: aquí el contenido volátil (hidrocarburos y agua) son llevados a temperaturas generalmente entre 100 y 300 °C. No se requiere agentes oxidantes y depende sólo del calor suministrado.
- Pirólisis y gasificación: La pirólisis es la descomposición adicional de las sustancias orgánicas en la ausencia de un agente oxidante a 250-700°C. La gasificación de los residuos carbonosos es la reacción de los residuos con vapor de agua y CO₂ a temperaturas típicas entre 500 y 1000 °C, pero puede ocurrir hasta los 1600 °C. Así que la materia orgánica sólida es transferida a la fase gaseosa. Además, la temperatura, el agua, el vapor y el oxígeno apoyan esta reacción.
- Oxidación: los gases combustibles creados en las etapas previas se oxidan, dependiendo del método de incineración seleccionado, las temperaturas de los gases de combustión generalmente se encuentran entre los 800 y 1450 °C.

Dichas etapas generalmente se superponen, lo que significa que la separación temporal y espacial durante la incineración de los residuos sólo puede ser posible en una medida limitada. De hecho, los procesos ocurren en parte en paralelo y se influyen entre sí (Buekens, 2013).

Durante la incineración se producen gases de combustión que contienen la mayoría del combustible energético disponible como calor. La fracción orgánica de la basura se quemará cuando se haya alcanzado la temperatura de ignición necesaria y al entrar en contacto con el oxígeno. El proceso actual de combustión toma lugar en la fase gaseosa en fracciones de segundo y de manera simultánea se recupera la energía. Cuando el valor del poder calorífico suministrado por la basura y el oxígeno es suficiente, se puede llevar a una reacción en cadena

y una combustión autosuficiente, es decir que no hay necesidad de adicionar otro tipo de combustible.

Para una combustión oxidativa efectiva, es esencial suministrar suficiente oxígeno. El número de la relación del aire de incineración suministrado por el aire estequimétrico requerido, usualmente oscila entre los valores 1.2 a 2.5 dependiendo si el combustible es gas, sólido o líquido y del sistema del horno (European Comisión, 2010).

En una incineración oxidativa completa, los principales constituyentes de los gases de combustión son: Vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno. Dependiendo de la composición del residuo incinerado y de las condiciones de operación pueden producirse o permanecer cantidades más pequeñas de compuestos como lo son: CO, HCl, HF, HBr, HI, NO_x, SO₂, VOCs, PCDD/F, PCB y metales pesados.

La cámara de postcombustión es necesaria, prácticamente, en todos los incineradores de residuos peligrosos sólidos y líquidos, debido a que la primera cámara no proporciona suficiente tiempo de residencia ni la temperatura para destruir los componentes orgánicos del residuo y conseguir la destrucción requerida.

2.3.4 RECUPERACIÓN ENERGÉTICA

El objeto de la incineración, en común con los demás tratamientos, es tratar los residuos reduciendo su volumen y peligrosidad, mientras que se captura o destruye sustancias potencialmente perjudiciales. El proceso de incineración también puede proveer un medio para permitir la recuperación de energía, mineral y/o contenido químico de la basura.

El aprovechamiento del calor de los residuos se puede clasificar en tres estrategias empleadas por las plantas de incineración denominadas “Waste to Energy” (WtE):

- a) Aquella donde solamente se produce calor,
- b) Centrales eléctricas sin liberación de calor
- c) Sistemas de cogeneración donde el calor y la electricidad son producidos simultáneamente.

El promedio neto de la eficiencia de producción estimado para el primer grupo es del 63%. La eficiencia neta para las centrales eléctricas a base de residuos alcanza el 18%. En el caso de la cogeneración, puede ser esperada una eficiencia total del 43% (Pavlas, et al., 2010).

La premisa de cómo deben ser tratados los residuos, pensando en un aprovechamiento, se puede contestar presentando otras alternativas que pueden ser elegidas según las características de los materiales (Münster & Meibom, 2011). La Tabla 5 muestra estas alternativas, así como un balance de las entradas y los beneficios de las tecnologías denominadas “WtE”.

Tabla 5. Entradas y Salidas en tecnologías Waste to Energy (Tabasova, et al., 2012).

WtE	Entrada	Salida
Incineración de Residuos	Mezcla de residuos, no hay almacenamiento, LHV 10.5 MJ/kg	Baja producción de electricidad y salida de vapor de alta.
Co-combustión con carbón	Clasificados, RDF pre-tratados, almacenable, LHV 16.5 MJ/kg, requiere mínimo 93% de carbón.	Alta salida de electricidad y calor.
Co-gasificación térmica con carbón para CHP y producción de biocombustible	Mezcla de residuos pre-tratados, no hay almacenamiento, LHV 10.5 MJ/kg, requiere mínimo de 75% de carbón.	Se elige entre bio-petróleo o producción de CHP con una alta producción de electricidad y calor.
Gasificación térmica para CHP	Clasificados, RDF pre-tratados, almacenable, LHV 16.5 MJ/kg	Alta producción de electricidad y calor.
Gasificación térmica para la producción de biocombustible	Clasificados, RDF pre-tratado, almacenable, LHV 16.5 MJ/kg	Dimetil-éter
Digestión anaerobia para CHP	Clasificados, residuos orgánicos pre-tratados, no almacenables, LHV 2.5 MJ de biogás por kg de residuo orgánico	Alta producción de electricidad y calor.
Digestión anaerobia para la producción de biocombustible	Clasificados, residuos orgánicos pre-tratados, no almacenables, LHV 2.5 MJ de biogás por kg de residuo orgánico	Biogás limpio, mejorado y comprimido.

RDF consiste principalmente en residuos de papel, cartón, plásticos y comida. Se asume que los RDF ascienden como máximo al 19% de la energía contenida del total de las fuentes de residuos.

LHV por sus siglas en inglés se refiere al valor calorífico inferior

CHP se refiere a la producción combinada de calor y electricidad

En nuestros días, la energía es una consideración clave en la discusión acerca del desarrollo sustentable. Por lo que se requiere un suministro sustentable de fuentes de energías renovables asequibles y limpias que no cause impactos sociales negativos. Los combustibles a base de residuos y biomasa son usualmente vistos como fuentes de energía renovable (Kothari, et al., 2010). Los residuos son convertidos en energía útil en formas tales como hidrógeno (biohidrógeno), biogás, bioalcohol, ente otros, a través de tecnologías WtE.

2.3.5 DEPURACIÓN DE GASES

Las emisiones de una planta de incineración están influenciadas principalmente por el tipo de residuos que entran al sistema, el diseño y operación del horno y el diseño y operación de los componentes del sistema de lavado de gases. Los principales subproductos de la incineración son los siguientes:

- **Monóxido de carbono:** Es un gas tóxico inodoro, producto de una combustión incompleta de compuestos con base de carbono, el cual se presenta cuando no existe la suficiente cantidad de oxígeno o una temperatura de combustión menor a la requerida para poder llevar a cabo la oxidación a dióxido de carbono de dichos compuestos. Una medición continua de la concentración de CO en los gases de combustión puede servir para checar la eficiencia del proceso de incineración. Deben evitarse altas concentraciones de este gas, debido a que pueden crear mezclas explosivas en los gases de combustión.
- **Carbono orgánico total:** Este parámetro incluye diferentes sustancias orgánicas gaseosas, su detección individual puede ser compleja o no posible. Durante la incineración de componentes orgánicos se genera una serie de reacciones, algunas de manera incompleta, sin embargo la incineración generalmente provee una eficiencia de destrucción alta de compuestos orgánicos.
- **Cloruro de hidrógeno:** Muchos residuos contienen compuestos clorados. En el proceso de incineración, los componentes orgánicos de estos compuestos son destruidos y el cloro es convertido a HCl. Es un compuesto altamente soluble en agua y puede reaccionar con otros compuestos inorgánicos contenidos en los residuos. La formación y emisión de Cl₂ es de menor importancia, sin embargo es esencial por el ensuciamiento

y la corrosión de los materiales. Debe de controlarse su formación en el proceso y evitar que este compuesto corrosivo de llegue a depositar en los tubos de la caldera.

- **Óxidos de nitrógeno:** Las instalaciones de incineración producen diferentes óxidos de nitrógeno, los cuales pueden tener efectos tóxicos, ácidos y de calentamiento global. El NO y el NO₂ se producen en el proceso de incineración mediante la conversión del nitrógeno contenido en los residuos (también llamado combustible NO_x) y de la conversión del nitrógeno atmosférico del aire de combustión (NO_x térmico). La generación de NO_x térmicos es más significativa a temperaturas superiores a los 1000°C.

El mecanismo de conversión del nitrógeno contenido en los residuos sólidos es muy complicado, debido a que puede estar contenido en diferentes formas. Dependiendo del tipo de residuos se asume una rapidez de conversión del 10-20% del nitrógeno combustible. Usualmente la proporción de NO/NO₂ en las emisiones es de 95% NO y 5% NO₂.

Cualquier técnica que reduzca la emisión es una opción válida, incluidos cambios en los insumos o materias primas, cambios en las condiciones del proceso, o la incorporación de equipo de control de emisiones. Finalmente, luego de considerar todas las formas operativas y de proceso viables para reducir las emisiones, habrá que tener en consideración la instalación de equipo para el control de las emisiones. A continuación se presenta una breve explicación de los dispositivos disponibles para tales efectos. (MJ Bradley & Associates, 2005).

- a. **Desulfuración de gases de chimenea:** Es la tecnología más utilizada para controlar la contaminación poscombustión en la quema de carbón. Existen dos tipos de procesos: “húmedo” y “seco”; en ambos procesos, a las emisiones se las “depura” de dióxido de carbono con carbonato de calcio o cal. Los equipos de desulfuración permiten extraer más del 90% del dióxido de azufre de los gases de combustión y pueden instalarse en las actuales centrales eléctricas. Si se combina el tratamiento de desulfuración de los gases de chimenea con modificaciones en la combustión se puede reducir la formación de óxidos de nitrógeno.
- b. **Depuradores húmedos:** Estos equipos extraen partículas gaseosas y líquidas; los agentes contaminantes se adhieren a una superficie húmeda extensa, tras lo cual

se lavan o se disuelven. Suponen una inversión de capital y gastos de explotación y mantenimiento relativamente elevados.

- c. **Depuradores Venturi:** Requieren una inversión de capital relativamente reducida y resultan eficaces para la recuperación de productos químicos y partículas. La diferencia con respecto a los depuradores húmedos es que la atomización del líquido depurador se hace por la presión neumática de un flujo de gas a alta velocidad (en vez de utilizar presión hidráulica).
- d. **Filtros:** Los sistemas de colección en seco extraen impurezas en suspensión de líquidos de procesos utilizando filtros de tela (un dispositivo similar, en principio, al de la bolsa de una aspiradora grande). Los filtros de tela pueden retener desde partículas de humo de menos de una micra de tamaño a polvos de 200 micras de diámetro.
- e. **Precipitadores electrostáticos:** Manejan grandes volúmenes de gas, pueden lograr rendimientos de hasta el 99,9% y consumen poca energía. Funcionan de manera análoga a una barra de vidrio frotada con un paño de seda, la cual se carga electrostáticamente y atrae partículas de pelusa y de papel sin carga. La inversión de capital y los gastos de explotación y mantenimiento no son especialmente elevados. Los precipitadores electrostáticos se utilizan para: extraer partículas de procesos de baja temperatura que generan grandes volúmenes de humos y polvos, reducir el volumen de contaminación atmosférica generado por el procesamiento de materiales como cemento, tratar los gases producidos por los altos hornos, por mencionar algunos ejemplos.
- f. **Extractores de polvo:** Trabajan por fuerza centrífuga; separan polvos, gotitas de agua y gases. Por ser fáciles de construir y carecer de piezas mecánicas, pueden fabricarse con un vasto espectro de materiales; trabajan hasta a temperaturas de 1,100°C. La inversión de capital y los gastos de explotación y mantenimiento son bajos.
- g. **Adsorbedores de gas:** Se sirven de la capacidad de ciertos sólidos de concentrar en su superficie sustancias presentes en un flujo gaseoso. Pueden eliminar dos importantes impurezas condensables: el dióxido de carbono y el vapor de agua. Los

costos de inversión no son especialmente elevados, pero los gastos de explotación y mantenimiento sí pueden serlo.

2.3.6 MONITOREO DE EMISIONES

La contaminación atmosférica es inherente a las actividades humanas, en especial a las industriales y del transporte. A través de los servicios de esta línea se determina el origen y disposición de sustancias, materiales, materias primas, subproductos, productos y efluentes que contaminan a la atmósfera por su extracción, tratamiento, distribución, transformación, uso y consumo en la industria, en el transporte y en la sociedad, con la finalidad de definir su efecto en el aire ambiente, dentro del marco regulatorio y normativo para las emisiones e inmisiones que afectan la calidad del aire, incluyendo los análisis de propiedades físicas, composición y propiedades químicas de dichos compuestos (IMP, 2011).

El monitoreo continuo de emisiones en fuentes fijas determina la concentración de los contaminantes presentes en los gases que emite un equipo de combustión mediante técnicas instrumentales específicas para cada contaminante. El monitoreo, además de cumplir con la legislación ambiental, permite conocer las condiciones de operación del equipo de combustión y, así reducir la generación de emisiones a la atmósfera que puedan causar daños al ambiente, la salud humana o los bienes de la población.

Como opciones adicionales se pueden realizar de manera paralela o independiente, el inventario teórico de emisiones. Los inventarios de emisiones son conjuntos de datos que identifican y cuantifican las emisiones de contaminantes de las fuentes y que sirven para elaborar un plan de mejoramiento de la calidad del aire. Además, son instrumentos importantes para la comunicación con las autoridades y la sociedad a través del cumplimiento de las diferentes reglamentaciones.

Entiéndase por monitoreo continuo al que se realiza con equipo automático con un mínimo de 15 lecturas en un periodo no menor de 60 minutos y un periodo no mayor de 360 minutos. El resultado del monitoreo es el promedio del periodo en el que se llevó a cabo el muestreo. La NOM-098-SEMARNAT-2002 establece las siguientes medidas al respecto susceptibles de verificar para determinar su cumplimiento:

- a. La instalación de incineración debe contar con sistemas para la medición continua de indicadores de buenas prácticas de operación y control, contando por lo menos con un equipo de monitoreo continuo para la temperatura de la cámara de combustión final y para las emisiones de monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O₂), a la salida de los gases de chimenea.
- b. Para llevar a cabo la medición de las emisiones a la atmósfera, los incineradores deben contar con plataforma y puertos de muestreo en el ducto de salida de los gases de acuerdo con lo establecido en el artículo 17 fracción III del Reglamento de la Ley en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera y de acuerdo a lo especificado en la Norma NMX-AA-009/1993-SCFI, referida en el punto 3 de esta Norma Oficial Mexicana.

La Norma Mexicana NMX-AA-009/1993-SCFI tiene por objeto establecer el método para determinar el flujo de gases en un conducto por medio del tubo de Pitot, sin embargo en su apéndice A denominado “Localización de plataformas y puertos de muestreo” se dictan las especificaciones de instalación de los puntos de muestreo, así como las condiciones de espacio para realizar el monitoreo.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La Figura 2 muestra la metodología que se utilizó para realizar el análisis conceptual de aspectos técnicos, ambientales y legales, necesarios en la formulación de proyectos de implementación del proceso de incineración de residuos peligrosos en México.

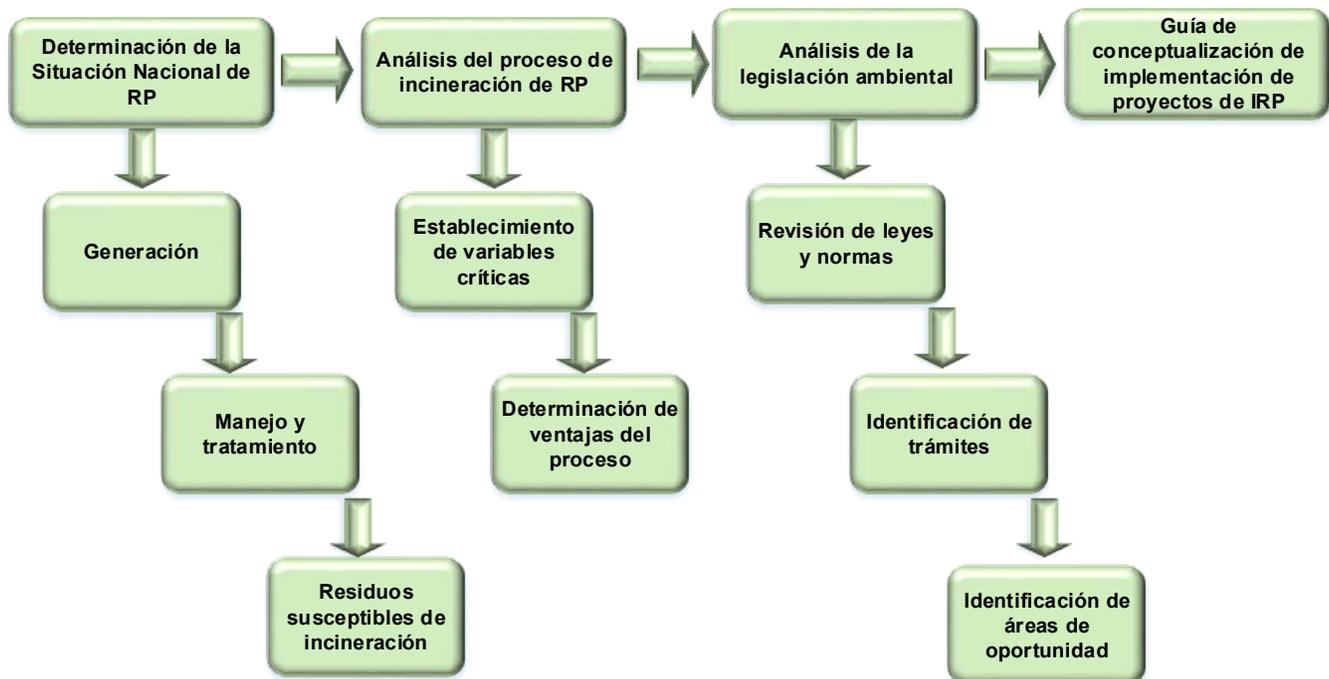


Figura 2. Metodología general

- 1. Determinación de la situación actual del manejo de RP:** Partiendo de la información estadística disponible se realizó un análisis de datos para determinar el estado actual de la gestión ambiental nacional de residuos peligrosos;
- 2. Análisis del proceso de incineración:** Para determinar el diseño de incineración más adecuado se deben identificar cada una de las variables involucradas y las tecnologías comúnmente empleadas.
- 3. Revisión de Legislación aplicable a la Incineración de RP:** Mediante un análisis de la normatividad vigente en el país referente al control y manejo de residuos peligrosos, así como del control de las instalaciones de incineración de residuos, se realizó una síntesis de los puntos básicos a cumplir.

4. **Guía para la conceptualización de proyectos de incineración de residuos peligrosos:** Se plantearon una serie de criterios técnicos, ambientales y legales por atender, que permitan implementar este procesamiento en el país.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO Y RESULTADOS

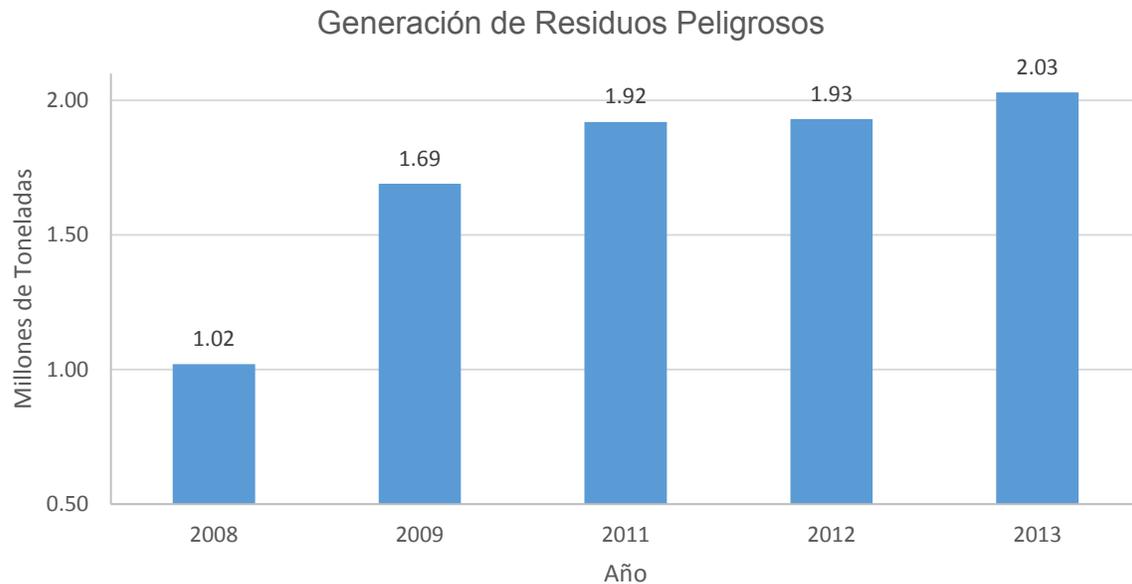
Los resultados del trabajo se presentan en tres aspectos fundamentales, los cuales se han desarrollado dentro de los ámbitos ambientales, técnicos y legales. A continuación se describe la situación nacional actual del manejo y tratamiento de los residuos peligrosos, se establecen las variables críticas del proceso de incineración y se resumen las bases legales para el manejo y tratamiento de residuos peligrosos por medio de la incineración.

4.1 SITUACIÓN NACIONAL DE LOS RP

La información presentada considera la generación de residuos peligrosos, así como las actividades asociadas al manejo integral de los mismos. Los datos que se presentan corresponden al cierre del año 2013 y aparecen en “Integración y Actualización del Inventario Nacional de Generación de Residuos Peligrosos” realizada por la SEMARNAT durante el 2014.

4.1.1 GENERACIÓN NACIONAL

La Gráfica 1 muestra los datos del periodo 2008-2013 (sin datos del año 2010) en cuanto a la generación de residuos peligrosos, se ha tomado en cuenta sólo a los generadores registrados ante la SEMARNAT, debe considerarse que estas cantidades son aún mayores debido a que se tienen identificados más de 170 mil generadores potenciales de residuos peligrosos (PROFEPA, 2010). El mayor incremento de generación se observa durante el año 2009, esto es debido a que hubo un incremento de las empresas que se registraron ante la SEMARNAT durante ese año.

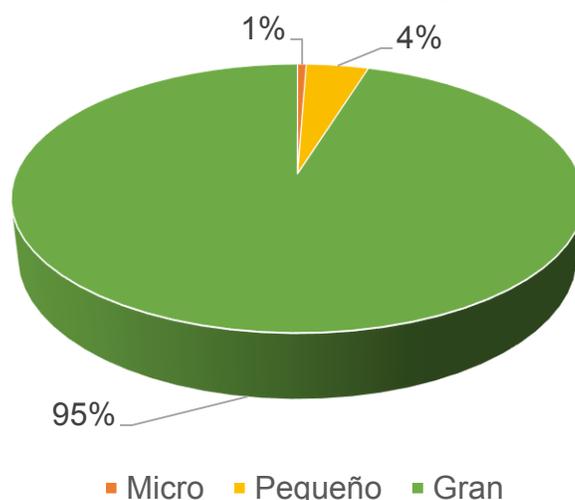


Gráfica 1. Generación de residuos peligrosos proveniente de empresas generadoras reportadas ante la SEMARNAT (SEMARNAT, 2010 b), (González Hernández, 2012), (INECC, 2012), (SEMARNAT, 2013).

El Inventario Nacional de Generación de Residuos Peligrosos tiene registradas ante la Secretaría como generadoras de residuos peligrosos a poco más de 84 mil empresas, de las cuales más de 47 mil son micro generadoras, 30 mil son pequeñas generadoras y poco más de 6 mil son grandes generadoras. Se destaca que el 100 % de estas empresas generaron un total de 2.035 millones de toneladas entre el periodo de años 2004-2013, lo que equivale a $2,035\text{m}^3$, este dato se obtuvo con la máxima densidad del agua, la cual es 1000 kg/m^3 a los 4°C (Theodore & Reynolds, 2000).

Las empresas registradas como grandes generadores, son las responsables del 95 % (19 mil toneladas) del total de residuos peligrosos, los pequeños generadores del 4 % (85 mil toneladas) y los micro generadores tan sólo del 1% (12 mil toneladas), ver Gráfica 2.

Generación de RP por tipo de generador



Gráfica 2. Generación de residuos peligrosos provenientes de grandes, pequeños y micro generadores correspondientes a los años 2004-2013 (SEMARNAT, 2013)

En adición a la información de la generación de desechos, se reporta la generación de residuos peligrosos por sector industrial. La Tabla 6 muestra una generación heterogénea.

Tabla 6. Generación de residuos peligrosos por sector industrial (SEMARNAT, 2013).

Sector Industrial	Total Generado (Ton 2004-2013)	% Generado
Servicios Prestadores de Servicios y Generadores de RP	816,798	40.14%
Química	209,596	10.30%
Metalúrgica	188,899	9.28%
Automotriz	174,536	8.58%
Servicios Mercantil GRP	122,809	6.03%
Equipos y artículos electrónicos	86,338	4.24%
Alimenticio	78,911	3.88%
Pinturas y tintas	58,380	2.87%
Artículos y productos metálicos	53,345	2.62%
Petróleo y petroquímica	52,202	2.57%
Servicios de Manejo de RP	35,771	1.76%
Artículos y productos de diferentes materiales	34,066	1.67%
Artículos y productos de plástico	29,135	1.43%
Prendas y artículos de vestir	15,729	0.77%
Cemento y cal	14,795	0.73%
Generación de energía eléctrica	13,569	0.67%

Sector Industrial	Total Generado (Ton 2004-2013)	% Generado
Construcción	10,918	0.54%
Celulosa y papel	9,511	0.47%
Vidrio	7,888	0.39%
Textil	7,725	0.38%
Madera y productos	4,803	0.24%
Exploraciones y explotaciones minerales	4,149	0.20%
Marítimo	1,108	0.05%
Congelación, hielo y productos	871	0.04%
Minero	764	0.04%
Agricultura	550	0.03%
Siderúrgica	525	0.03%
Explotación de bancos de materiales	354	0.02%
Acuicultura	347	0.02%
Comunicaciones	238	0.01%
Asbesto	223	0.01%
Forestal	180	0.01%
Vida silvestre	36	0.002%
Total	2035069	100%

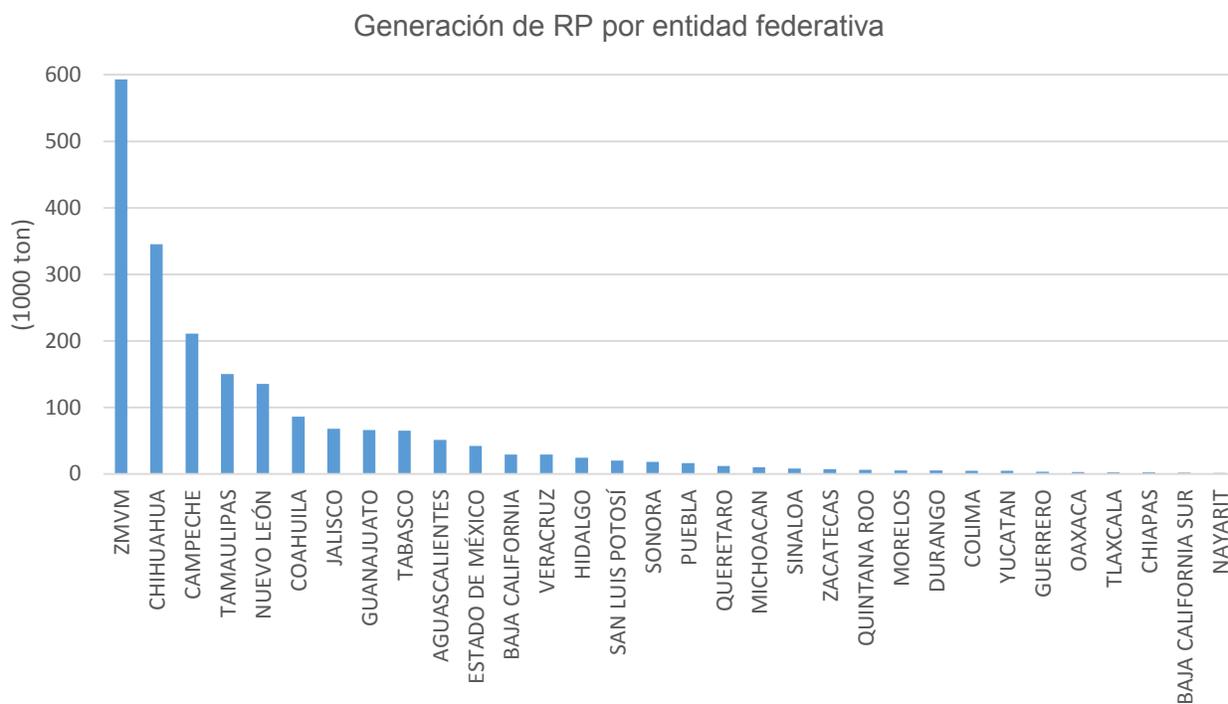
Según los reportes oficiales de la SEMARNAT, el sector con mayor generación, es el de los prestadores de servicios de manejo de residuos peligrosos (SEMARNAT, 2013). La composición de los residuos que maneja este sector es muy heterogénea, pues comprende tanto transportistas de materiales peligrosos, así como grupos de generadores de residuos biológico infecciosos (INECC, 2012). Los datos correspondientes a la generación de RP por tipo de corriente están clasificados como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Generación de residuos peligrosos por tipo entre los años 2004-2013 (SEMARNAT, 2013).

Tipo de residuo	Generación de Residuos Peligrosos (ton)	% de Generación
Sólidos	913,509	45%
Aceites gastados	423,792	21%
Otro	167,103	8%
Lodos	162,513	8%
Biológico-Infeccioso	147,966	7%
Escorias	72,770	4%
Solventes	67,918	3%
Lodos de Proceso	57,723	3%
Sustancias Corrosivas	21,196	1%

Tipo de residuo	Generación de Residuos Peligrosos (ton)	% de Generación
Breas	579	0.0003
Total	2,035,068	100%

Con relación a los datos de generación de residuos peligrosos por tipo, se observa que los más generados son los sólidos con un 45 %, siguen los aceites gastados con 21 %, lodos y otra clasificación con un 8 %. Además se cuenta con datos estadísticos referentes a la generación de residuos peligrosos por región del país. La Gráfica 3 y la Figura 3 muestran la distribución regional.



Gráfica 3. Generación de residuos peligrosos por región en el periodo del 2004 a 2013 (SEMARNAT, 2013)

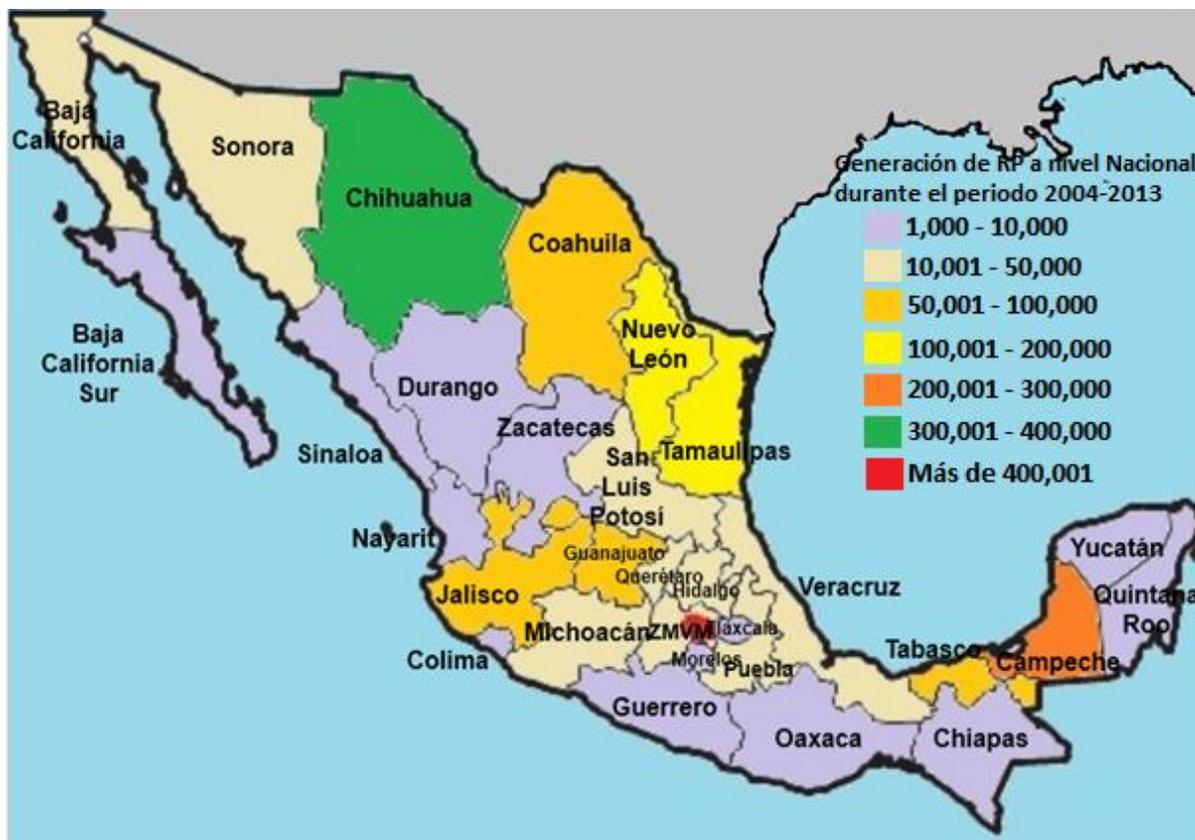


Figura 3. Generación de residuos peligrosos por región en el periodo del 2004 a 2013 (SEMARNAT, 2013).

La Zona Metropolitana del Valle de México ZMVM es la que generó más RP, 29.14% del total de los residuos provienen de dicha zona, en segundo lugar se encuentra Chihuahua con 16.99% y Campeche con un 10.41 %.

4.1.2 MANEJO Y TRATAMIENTO NACIONAL

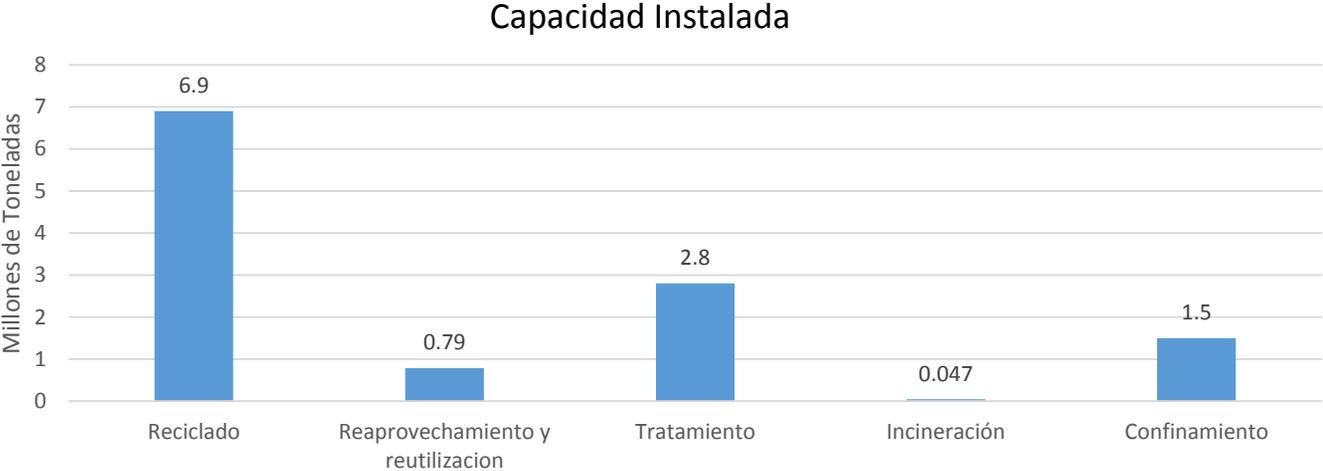
México registró una capacidad de disposición de residuos total instalada de 10.9 millones de toneladas para el año 2014 (SEMARNAT, 2014). La capacidad de reciclar y/o co-procesar Residuos Peligrosos es de un total de 5.9 millones por año, lo que representa un 54.13% del total. Las instalaciones autorizadas para reaprovechar residuos peligrosos con potencial de ser incinerados suman una capacidad de 756 mil toneladas por año, siendo esta cifra un 6.88 % del total. La SEMARNAT tiene 32 cementeras autorizadas para el co-procesamiento de residuos peligrosos, las cuales pueden sustituir hasta el 30% del combustible alternativo en su proceso

(SEMARNAT, 2014). La capacidad instalada para tratar residuos peligrosos total es de 2.8 millones de toneladas por año, lo que es el 25.69 % del total.

La SEMARNAT tiene un registro de 10 plantas incineradoras de RP autorizadas, en el ANEXO 3 aparecen seis plantas, debido a que las otras cuatro incineran residuos biológico-infecciosos, la capacidad que suman en su totalidad es de 47 mil toneladas siendo éste tan sólo el 0.43%. Debido a que este trabajo no considera a los residuos peligrosos del tipo biológico-infecciosos, la capacidad disminuye a 27,800 toneladas por año. Se tiene una capacidad de 1.5 millones de toneladas para confinar residuos peligrosos representando el 1.5 % del total de capacidad.

Estos datos se pueden apreciar de manera visual en la Gráfica 4. La suma de estas cifras no corresponde al 100 por ciento debido a que el 12% faltante forma parte del almacenamiento y transporte, y estas actividades son consideradas como actividades secundarias de manejo.

En el Anuario Estadístico y Geográfico de los Estados Unidos Mexicanos (AEGEUM) presentado para el año 2013, se reporta una serie de datos correspondiente a la infraestructura instalada para el manejo de residuos peligrosos. La Tabla 8 muestra dicha serie.



Gráfica 4. Capacidad instalada de tratamiento de residuos peligrosos para el año 2014 (Elaboración propia con datos de (SEMARNAT, 2014)).

Tabla 8. Infraestructura instalada para el manejo de RP (INEGI, 2012)

Serie anual de 1995 a 2012								
Plantas								
Año	Total	Acopio	Recolección y transporte	Reciclaje de solventes sucios, lubricantes usados y metales b/	Reúso	Incineración de combustibles alternos y residuos c/	Tratamiento de residuos	Confinamiento
1995	163	25	70	38	4	1	21	4
1996	222	29	99	44	5	7	34	4
1997	374	49	178	78	6	13	46	4
1998	480	53	237	95	6	31	54	4
1999	722	107	354	137	7	35	78	4
2000	811	121	396	152	8	39	91	4
2001	841	123	411	159	9	42	93	4
2002	873	124	411	167	9	44	114	4
2003	970	128	428	204	10	55	141	4
2004	1025	129	433 e/	219	11	59	170	4
2005	1090	131	457	245	13	59	180	5
2006	1173	136	474	286	13	59	197	8
2007	1210	141	487	306	13	61	212	8
2008	1238	148	508	325	13	62	220	8

Serie anual de 1995 a 2012								
Plantas								
Año	Total	Acopio	Recolección y transporte	Reciclaje de solventes sucios, lubricantes usados y metales b/	Reúso	Incineración de combustibles alternos y residuos c/	Tratamiento de residuos	Confinamiento
2009	1258	158	530	338	13	65	224	8
2010	1262	172	544	355	14	68	227	8
2011	1308	177	569	378	14	68	230	8
2012	1326	250	738	390	14	69	235	8
Nota: Los datos corresponden al número de plantas 2012, con base en el Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, se excluyen las autorizaciones nuevas de acopio, recolección y transporte, por tratarse de actividades secundarias de manejo, por lo que la sumatoria difiere del total.								
a/ Comprende el almacenamiento								
b/ Incluye líquido fijador fotográfico y trapos impregnados con grasa y aceite.								
c/ Incluye residuos peligrosos y biológico-infecciosos.								
d/ Incluye disposición final								
e/ Se refiere a la recolección en su lugar de origen de Bifenilos Policlorados (BPC's), para su posterior exportación.								

A diferencia de la SEMARNAT que tiene en su registro 10 plantas incineradoras, el Anuario reporta 69 plantas de incineración de combustibles alternos y residuos peligrosos, incluyendo los residuos del tipo biológico-infecciosos. Además se observa el incremento de esta práctica en el país; en 1997 había 13 plantas y en el año 1998 aumentaron a 31 plantas instaladas, lo que se manifiesta en un incremento del 238 % y con base al registro de 1995 al 2012 se ve un incremento de esta práctica en un 690%, con 69 plantas instaladas para incinerar. Las alternativas que han sufrido pequeños aumentos en construcción de nuevas instalaciones son las que se dedican al reúso de los materiales así como al confinamiento de los mismos.

4.1.3 ESTIMACIÓN DE RP SUSCEPTIBLES A LA INCINERACIÓN

En general, para que el proceso de incineración resulte económicamente viable, los residuos incinerables deben poseer un poder calorífico de por lo menos 11.6 GJ/ton (Hernández Islas, 2010) y preferentemente mayor de 18.5 GJ/ton, que tengan una matriz fundamentalmente orgánica dentro de un rango del 14-20 % (UTJ, 2009) y no más del 60-70 % de contenido de agua. Algunos de los residuos susceptibles a incinerar son los disolventes, barnices, látex, parafinas, aceites gastados, insecticidas, adsorbentes, embalajes, productos orgánicos de la síntesis: química, ceras, breas, pinturas, resinas, hidrocarburos y grasas, entre otros (Díaz Blanco, 2008) (Jaime Paredes, 2007), la Tabla 9 indica los intervalos de poder caloríficos netos para residuos industriales y peligrosos.

Tabla 9. Intervalos y poder caloríficos netos típicos para residuos industriales y peligrosos de entrada en incineradoras (Unión Europea, 2011 a).

Tipo de residuo de entrada	Comentarios y ejemplos	PCN en la sustancia original (humedad incluida)	
		Intervalo GJ/ton	Media GJ/ton
Residuos industriales específicos de productos	Ej. Residuos de la industria de producción de plásticos o papel	18-23	20

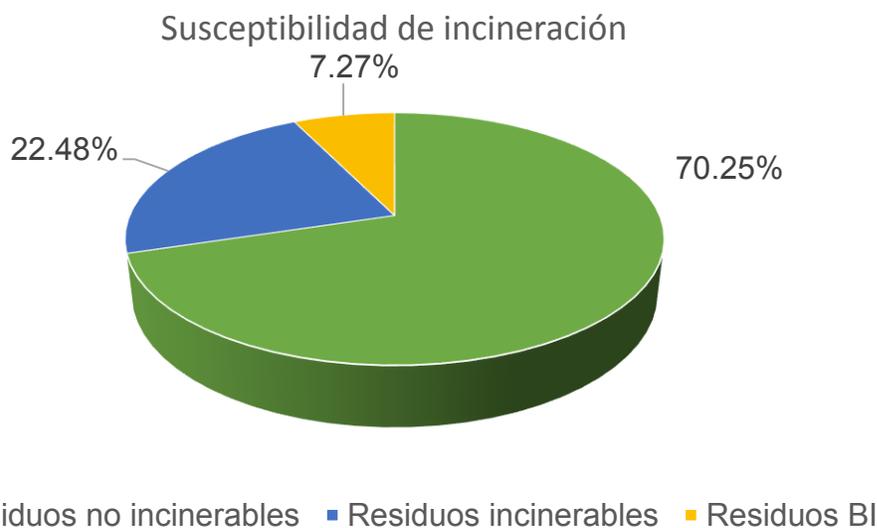
Tipo de residuo de entrada	Comentarios y ejemplos	PCN en la sustancia original (humedad incluida)	
		Intervalo GJ/ton	Media GJ/ton
Residuos peligrosos	También denominados residuos químicos o especiales	0.5-20	9.75

La Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, proporciona el registro de generación de Residuos Peligrosos, la información está clasificada en dos documentos: Generación por tipo o corriente de residuo y generación por categoría de generador y sector de actividad. La estimación se basó en la suma de los residuos que pueden cumplir con las características de un residuo incinerable. La Tabla 10 muestra los residuos considerados en la estimación.

Tabla 10. Residuos susceptibles de incineración (SEMARNAT, 2013).

Tipo de residuo	Generación (1000 ton)
Aceites	
Lubricantes	203
Lodos	
Aceitosos	34
Proceso de pintura	45
Tratamiento de aguas de proceso	20
Tratamiento de aguas negras	11
Sólidos	
Telas, pieles o asbesto	77
Solventes	
Orgánicos	67
Total Incinerable	457
Total Generado	2,035

La cantidad de residuos susceptibles de incineración se calculó mediante la clasificación proporcionada por la SEMARNAT, la cual suma un aproximado de 457 mil toneladas, lo que representa el 22% de la generación total, ver Gráfica 5. Cabe destacar que por los alcances de este trabajo no incluyen los residuos del tipo biológico infecciosos.



Gráfica 5. Residuos susceptibles de incineración (elaboración propia).

Los registros ante la Secretaria no representan el total de la generación de residuos peligrosos, pero considerando que los generadores potenciales son casi 170 mil, se puede realizar una proyección de los valores, los resultados se observan en la Tabla 11.

Tabla 11. Proyección de datos (Elaboración Propia).

Dato	Valor reportado (Ton)	Proyección (Ton)
Generación (2004-2013)	2.03 millones	4.07 millones
Generación 2013	99 mil	198 mil
Residuos Susceptibles de incineración (2004-2013)	457 mil	914 mil
Residuos susceptibles de incineración 2013	21 mil	42 mil

Los reportes oficiales de la SEMARNAT mencionan una generación de 2.03 millones de toneladas durante el periodo 2004-2013, pero si se considera un aumento en la generación lineal, se proyecta una generación de 4.07 millones de toneladas para el mismo periodo. Por otro lado, la capacidad instalada para incinerar residuos peligrosos es de 27,800 toneladas anuales, excluyendo a los residuos del tipo Biológico-infecciosos. De tal manera que si se

procesara el total de la proyección de los residuos susceptibles de incineración, la capacidad sería insuficiente, debido a que se generan aproximadamente 42 mil toneladas anuales.

4.2 EL PROCESO DE INCINERACIÓN

El proceso de incineración está formado por un conjunto complejo de componentes que interactúan durante el tratamiento global de los residuos, cada uno de estos componentes tiene una finalidad ligeramente distinta. El proceso global se muestra en la Figura 4 representado de una manera general.

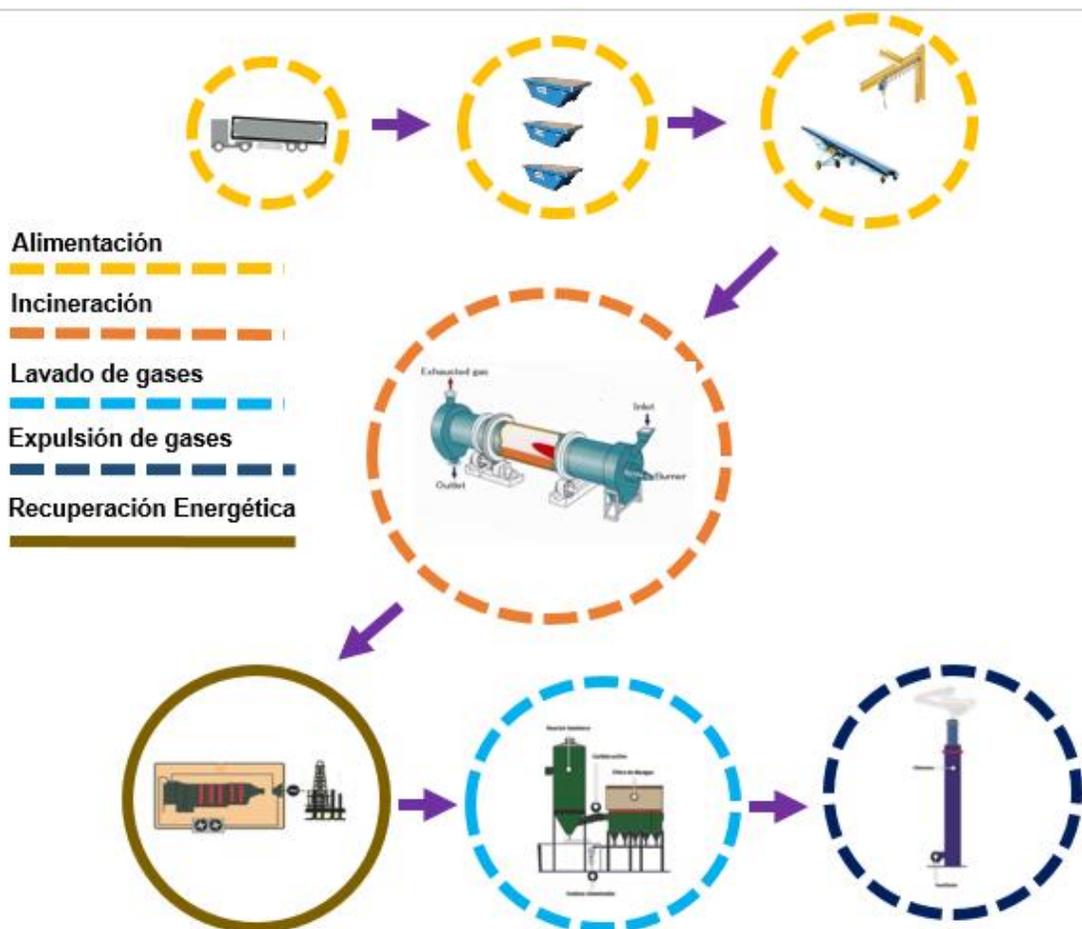


Figura 4. Diagrama general del proceso de incineración

- **Alimentación:** La alimentación de residuos tiene variables críticas que, de ser controladas, el proceso puede ser eficiente de manera global, por ejemplo la caracterización de los residuos y la variabilidad de la materia prima.
- **Incineración:** Es la oxidación del material combustible contenido en los residuos, durante esta etapa se producen gases de combustión que contienen la mayoría del combustible energético disponible como calor, esta etapa del proceso tiene como variable crítica la temperatura, ya que de ella depende la minimización de la peligrosidad de los residuos.
- **Lavado de gases:** Para el lavado de gases, el costo de depuración es una consecuencia directa de la alimentación de los residuos, puede representar de un 15 a un 35 % del total de la inversión. En esta etapa se eliminan principalmente, compuestos organoclorados y gases ácidos.
- **Recuperación energética:** Existe una etapa adicional que puede formar parte del proceso de tratamiento de residuos peligrosos, la recuperación energética es un beneficio adicional de este proceso. Sin embargo, la eficiencia aún no es comparable con la que ofrece una planta convencional que quema combustibles.

4.2.1 ESTABLECIMIENTO DE VARIABLES CRÍTICAS DEL PROCESO

La identificación de variables críticas, surge a partir del análisis del proceso de incineración, para lo que se consideró la información disponible de las experiencias de la industria documentada en publicaciones. A continuación se presentan las variables críticas identificadas por etapa:

ALIMENTACIÓN DE RESIDUOS

- i. **Caracterización de la materia prima;** Es muy importante contar con la caracterización de los residuos a incinerar, pues esto impactará directamente en la etapa de combustión y en las emisiones generadas a partir de ésta. Existen algunas consideraciones con respecto al tipo de residuos a alimentar, por ejemplo, deben incinerarse residuos con una capacidad calorífica mayor a 11.6 GJ/ton (Hernández Islas, 2010), con el objeto de disminuir el consumo de combustible auxiliar, además se deben evitar los residuos con

una alta concentración de sulfuros, de plomo, cromo, mercurio, hidrocarburos aromáticos poli-cíclicos, benceno, tolueno, etil-benceno y xilenos, debido a que cuando se incineran estos residuos los gases de combustión contienen esos mismo contaminantes lo que incrementa la complejidad de la etapa de depuración de gases (Jordão da Silva, et al., 2012).

- ii. **Variabilidad de la alimentación;** La variabilidad en la composición de los residuos impacta en la capacidad de optimizar el proceso. Con un intervalo estrecho es más fácil la optimización (Unión Europea, 2011 a). Esto a su vez tiene impactos sobre la estabilidad del proceso, así como del comportamiento ambiental, haciendo más simples las operaciones derivadas como la limpieza de los gases de combustión.

COMBUSTIÓN DE RESIDUOS:

- i. **Temperatura:** Por normatividad (NOM-098-SEMARNAT-2002), el valor se ha establecido como mínimo de 850 °C para los gases de combustión, sin embargo, para compuestos órgano-clorados la temperatura debe elevarse a 1100 °C. La temperatura es una variable importante durante el proceso de combustión, al ser uno de los parámetros que garantizan la destrucción eficiente de los residuos. Los incineradores que han demostrado ser más eficientes, cuentan con dos cámaras de combustión, en la primera se queman básicamente los residuos, y en la segunda los gases producto de la combustión de los residuos.
- ii. **Tiempo de residencia:** De igual manera, por normatividad (NOM-098-SEMARNAT-2002), se ha establecido un mínimo de 2 segundos en la segunda cámara de combustión, donde se lleva a cabo la oxidación de los gases producidos por la combustión del material sólido. Este parámetro tiene el fin de asegurar la combustión completa de los compuestos contaminantes en estado gaseoso, y de esta forma disminuir la cantidad de contaminantes a la entrada del lavado de gases.

RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

- i. **Eficiencia de recuperación energética:** La eficiencia de recuperación es afectada por diversos factores, tales como la caracterización de los residuos, la capacidad, así como del lugar donde se instalará la planta. Se alcanzan valores de eficiencia de hasta el 85 % con plantas que cuenta con un sistema de cogeneración (Generación de calor y electricidad), situadas en ciudades con demanda de calefacción o en zonas industriales con demanda de vapor (Clerens Consulting, 2012), con una capacidad de procesamiento mayor a las 250 ton/año (Grosso, et al., 2010) con residuos de poder calorífico mayor a 11.6 GJ/ton y un flujo con variabilidad mínima (Pavlas, et al., 2010).

EMISIONES A LA ATMÓSFERA

- i. **Costo de depuración:** La limpieza de los gases de combustión suele ser una importante contribución a los costos de incineración globales, aproximadamente de un 15-35% de la inversión total (Unión Europea, 2011 a). Este aspecto se deriva de la alimentación de residuos, debido a que la variabilidad de residuos alimentados puede provocar el aumento en la generación de contaminantes así como la diversificación de los contaminantes producidos, lo que se traduce en un aumento en la infraestructura y reactivos para la etapa de depuración de gases.

4.2.2 BENEFICIOS ASOCIADOS A LA INCINERACIÓN

La incineración limpia es una alternativa de disposición final de residuos peligrosos, si se considera dentro del plan de manejo de los residuos generados por las industrias del país se pueden obtener beneficios ambientales, tales como la minimización del riesgo de contaminación de suelos y mantos acuíferos. Además, el proceso posee las ventajas descritas a continuación:

- ✓ Elimina propiedades desagradables y peligrosas de los residuos.
- ✓ Los sólidos se tratan de manera térmica, se reduce el volumen hasta un 20% de la masa inicial.
- ✓ Se generan poco o ningún residuo gaseoso o líquido, con excepción de los vinculados al tratamiento de gases de combustión, y
- ✓ El calor generado proveniente de la combustión puede ser aprovechado

El diseño de un proceso de incineración de residuos peligrosos es complejo; se identifica la existencia de variables críticas que deben ser atendidas de manera adecuada para garantizar el éxito del proceso y obtener los beneficios de esta alternativa de disposición final. Las variables críticas son la caracterización y variabilidad de la materia prima, temperatura y tiempo de residencia de los gases de combustión, la eficiencia de recuperación energética y el costo de inversión del sistema de lavado de gases, que puede inclusive ser de hasta el 35% de la inversión total.

4.3 REGULACIÓN DE LA INCINERACIÓN DE RP

La regulación nacional de los residuos peligrosos comenzó en 1988, tras la publicación del Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos de la Ley General para el Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), en octubre de 2003 se publicó la nueva Ley en la que se basa actualmente su regulación, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (Cortinas de Nava, 2006).

En este trabajo se ha profundizado en revisar las bases legales que han propiciado el desarrollo de la regulación ambiental de residuos peligrosos en México, así como las prácticas para disponer de ellos, la Figura 5. Jerarquización de la legislación nacional aplicable a la incineración de Residuos Peligrosos (Elaboración propia). Figura 5 muestra la jerarquización en la que se basa la legislación de la incineración de residuos peligrosos, la cual será resumida a continuación.



Figura 5. Jerarquización de la legislación nacional aplicable a la incineración de Residuos Peligrosos (Elaboración propia).

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos es la Ley Suprema que establece los principios sociales y la organización del Estado, los artículos 25, 27 y 73 de la Constitución son el fundamento del marco legal en materia ecológica.

El concepto de desarrollo nacional sustentable se menciona por primera vez en el artículo 25, donde se especifica que el Estado es el responsable de encabezar la dirección para garantizar dicho fin. La nación tiene dominio sobre la propiedad de las tierras y aguas, siendo está capaz de transmitir los dominios a particulares, los que constituyen la propiedad privada, sin embargo la nación tiene el derecho de regular el aprovechamiento de los elementos con el objeto de cuidar de su conservación y lograr el desarrollo equilibrado del país. El Congreso tiene la facultad de expedir leyes en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

México firmó el Convenio de Estocolmo el 23 de mayo de 2001, en Suecia, convirtiéndose en el primer país Latinoamericano que ratificó este convenio el 10 de febrero del 2003, entró en

vigor el 17 de mayo del 2004. El convenio tiene por objeto proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los contaminantes orgánicos persistentes (COP), así como promover las mejores prácticas y tecnologías disponibles para reemplazar los que se utilizan actualmente y prevenir la generación de nuevos contaminantes a través del fortalecimiento de las legislaciones nacionales y la instrumentación de planes nacionales de implementación para cumplir dichos compromisos.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) fue publicada en el diario oficial de la federación el 28 de enero de 1988, proyecto de iniciativa del presidente Miguel de la Madrid, dicha ley es la base de la legislación ambiental mexicana. Se estructura alrededor de cuatro conceptos básicos: política ecológica, manejo de recursos naturales, protección al ambiente y participación social. En su título cuarto dedicado a la protección al ambiente contiene el rubro de materiales y residuos peligrosos donde se indican las disposiciones generales a atender.

Dentro de la ley se indica que es facultad de la Federación la regulación y el control, la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos teniendo como objetivo la preservación de los recursos naturales. Además, dentro de esta ley se establece la evaluación de impacto ambiental, procedimiento a través del cual la Secretaría regulará las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan un daño ambiental con el fin de reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente. De igual manera para la operación y funcionamiento de las fuentes fijas que emitan olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera, se requerirá autorización de la Secretaría. Se consideran fuentes fijas de jurisdicción federal, las industrias de tratamiento de residuos peligrosos.

Se requiere autorización previa de la Secretaría para la instalación y operación de sistemas para el tratamiento o disposición final de residuos peligrosos, o para su reciclaje cuando éste tenga por objeto la recuperación de energía, mediante su incineración. Sin embargo la Secretaría promoverá programas tendientes a prevenir y reducir la generación de residuos peligrosos, así como a estimular su reúso y reciclaje.

Como parte de la política ambiental del país, se publicó el 8 de octubre del 2003 la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) por el presidente Vicente Fox Quesada. En ella se exponen de manera general disposiciones aplicables en materia de residuos, la competencia y coordinación de los órdenes de gobierno e instituciones, así como el establecimiento de los instrumentos de la política de prevención, planes de manejo y esquemas de participación social.

Esta ley en materia de residuos peligrosos, tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, así como establecer las bases para regular la generación y manejo integral de residuos peligrosos, crear un sistema de información relativa a la generación y gestión integral de los residuos peligrosos. La clasificación de un residuo como peligroso, se establecerá en las normas oficiales mexicanas.

La incineración de residuos, deberá restringirse a las condiciones que se establezcan en el Reglamento y en las normas oficiales mexicanas correspondientes, en las cuales 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.

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.

Deberán distinguirse los residuos que por sus características, pudieran ser objeto de co-procesamiento. Se deberán establecerse restricciones a la incineración, o al co-procesamiento mediante combustión de residuos susceptibles de ser valorizados mediante otros procesos disponibles, sean ambientalmente eficaces, tecnológica y económicamente factibles. En tales

casos, deberán promoverse acciones que tiendan a fortalecer la infraestructura de valorización o de tratamiento de estos residuos, por otros medios.

Se prohíbe la incineración de residuos peligrosos que sean o contengan compuestos orgánicos persistentes y bio-acumulables; plaguicidas órgano-clorados; así como baterías y acumuladores usados que contengan metales tóxicos; siempre y cuando exista en el país alguna otra tecnología disponible que cause menor impacto y riesgo ambiental.

Atendiendo las disposiciones de la Constitución Política y de las leyes LGEEPA y LGPGIR se crearon dos normas de suma importancia en el tema tratado por este trabajo: la NOM-052-SEMARNAT-2005 y la NOM-098-SEMARNAT-2002 que establecen las características, el procedimiento de identificación y la clasificación de los residuos peligrosos, así como las especificaciones de operación, límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera para instalaciones de incineración de residuos, respectivamente.

La NOM-052-SEMARNAT-2005 tiene como objeto establecer el procedimiento para identificar si un residuo es peligroso, el cual incluye los listados de los residuos peligrosos y las características que hacen que se consideren como tales. El procedimiento para determinar si un residuo es peligroso se presenta en la figura del ANEXO 1. De igual manera, un residuo es peligroso si se encuentra en alguno de los 5 listados de la norma:

- Listado 1: Clasificación de residuos peligrosos por fuente específica.
- Listado 2: Clasificación de residuos peligrosos por fuente no específica.
- Listado 3: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Agudos).
- Listado 4: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (Tóxicos Crónicos).
- Listado 5: Clasificación por tipo de residuos, sujetos a Condiciones Particulares de Manejo.

La norma establece las características para determinar si un residuo es peligroso. El residuo es peligroso si presenta al menos una de las siguientes características:

- Corrosividad
- Reactividad
- Explosividad
- Toxicidad Ambiental
- Inflamabilidad
- Biológico-Infeciosa

La NOM-098-SEMARNAT-2002 tiene por objeto establecer las especificaciones de operación, así como los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las instalaciones de incineración de residuos. Esta norma establece las especificaciones que deben acatar las instalaciones de incineración. Debe destacarse que este apartado carece de claridad en cuanto al tipo de residuos que se incineran. La recepción de residuos está normada en el caso de los prestadores de servicios a terceros para la incineración de residuos peligrosos, sin embargo, existen otras clasificaciones de residuos que pueden ser incinerados, dentro del cual estos rubros no reflejan claramente los procedimientos a seguir con ellos.

La norma establece de manera general las condiciones de operación de una instalación de incineración de residuos. Las condiciones que debe cumplir una instalación de incineración de residuos son: temperatura mínima de 850 °C en la cámara de combustión final con un tiempo de residencia mínimo de dos segundos. En el caso de residuos peligrosos que contengan más del 1% de sustancias órgano-cloradas expresadas en cloro, la temperatura deberá elevarse como mínimo a 1100 °C con un tiempo de residencia mínimo de dos segundos, en este caso se debe conseguir una destrucción del 99.9999% del compuesto órgano-clorado con mayor estabilidad térmica. Dentro de las cámaras de combustión se debe operar a presiones negativas.

Además, se establece que se debe contar con indicadores de buenas prácticas de operación y control, contando por lo menos con un equipo de monitoreo continuo de temperatura en la cámara de combustión final y para las emisiones de monóxido de carbono y oxígeno. La temperatura a la salida del proceso no debe rebasar los 250 °C. Los límites máximos permisibles, la frecuencia de medición y los métodos de evaluación son los establecidos por la

Tabla 12 y se aplicarán todo el tiempo para las instalaciones de incineración, exceptuando los periodos de arranque y paro de los equipos.

Tabla 12. Límite de emisión de contaminantes a la atmósfera (NOM-098-SEMARNAT-2002)

Contaminante	Límite de emisión	Frecuencia de medición	Norma que aplica o método
CO (mg/m ³)	63	Continuo	Infrarrojo no dispersivo y Celda Electroquímica
HCl (mg/m ³)	15	Trimestral	NMX-AA-070-1980
NO _x (mg/m ³)	300	Semestral	Quimiluminiscencia
SO ₂ (mg/m ³)	80	Semestral	NMX-AA-55-1979
Partículas (mg/m ³)	50	Semestral	NMX-AA-10-SCFI-2001
Arsénico, Selenio, Cobalto, Níquel, Manganeso, Estaño (mg/m ³)	0.7*	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Cadmio (mg/m ³)	0.07	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Plomo, Cromo total, Cobre, Zinc (mg/m ³)	0.7*	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Mercurio (mg/m ³)	0.07	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Dioxinas y Furanos EQT (ng/m ³) Instalaciones de incineración nuevas	0.2	Anual	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución.

* Suma total de metales pesados

Contaminante	Límite de emisión	Frecuencia de medición	Norma que aplica o método
Dioxinas y Furanos EQT (ng/m ³) Instalaciones de incineración existentes antes de la publicación de la NOM	0.5	Anual	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución.

Todos los valores están referidos a condiciones estándar: 1 atm, base seca, 25 °C y 7 % de oxígeno, de acuerdo a la NOM-085-SEMARNAT-1994².

La autorización en materia de impacto ambiental, instalación y operación de sistemas de incineración de residuos peligrosos se encuentra detallada en el trámite de “Autorización para el Manejo de Residuos Peligros Modalidad F: Incineración” SEMARNAT-07-033-F, ver CAPÍTULO 7.ANEXO 2.

4.3.1 TRÁMITES Y PERMISOS APLICABLES A LOS PROYECTOS DE INCINERACIÓN

La LGEEPA y la LGPGIR prevén como requisito una serie de trámites, los que deben realizarse antes de comenzar la construcción de la planta de incineración, así como para poder operar y darle continuidad a la operación. El resultado de la revisión es la serie de trámites de la Figura 6.

² Contaminación atmosférica- fuentes fijas- Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmosfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

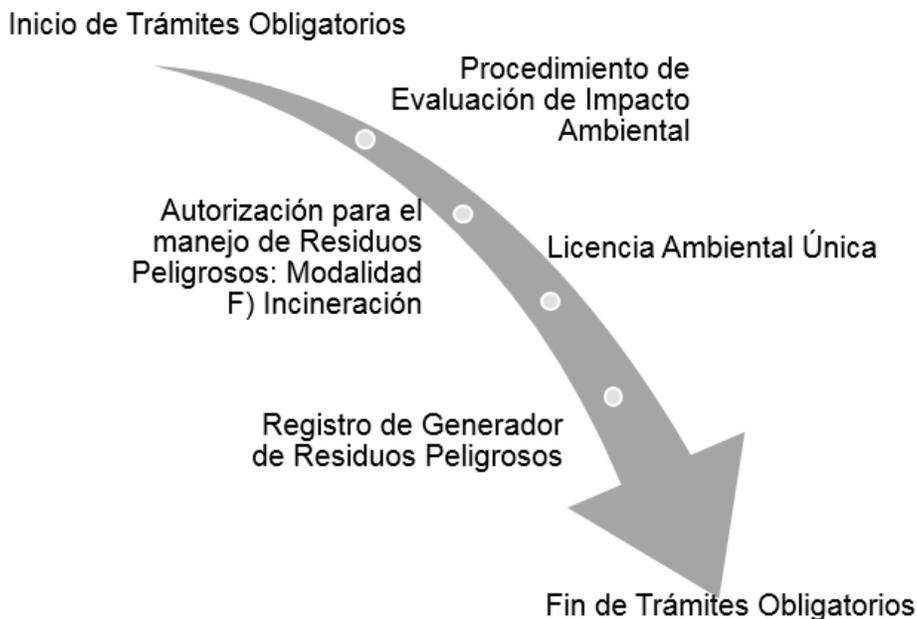


Figura 6. Guía de Trámites para la implementación de la incineración

EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

El artículo quinto del reglamento de la LGEEPA, indica que es necesario conseguir la autorización por parte de la Secretaría para construir y operar una planta de incineración de residuos peligrosos. La autorización se consigue mediante la presentación de una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) en su modalidad de particular. La MIA es un instrumento de la política ambiental, cuyo objetivo es prevenir, mitigar y restaurar los daños al ambiente así como la regulación de obras o actividades para evitar o reducir sus efectos negativos en el ambiente y en la salud humana. Además, el reglamento de la LGEEPA indica que el informe de la MIA debe contener la siguiente información:

- I. Datos generales del proyecto, del promovente y del responsable del estudio de impacto ambiental;
- II. Descripción del proyecto;
- III. Vinculación con los ordenamientos jurídicos aplicables en materia ambiental y, en su caso, con la regulación sobre uso del suelo;
- IV. Descripción del sistema ambiental y señalamiento de la problemática ambiental detectada en el área de influencia del proyecto;

- V. Identificación, descripción y evaluación de los impactos ambientales;
- VI. Medidas preventivas y de mitigación de los impactos ambientales;
- VII. Pronósticos ambientales y, en su caso, evaluación de alternativas, y
- VIII. Identificación de los instrumentos metodológicos y elementos técnicos que sustentan la información señalada en las fracciones anteriores.

Cabe destacar que la SEMARNAT pone a disposición de forma electrónica, una guía base para la realización del informe requerido de la MIA particular. En el caso de que el procesa tenga el propósito de incinerar alguna de las sustancias catalogadas en el Primero o Segundo Listado de “Materiales y Actividades Altamente riesgosas”, se deberá incluir el estudio de riesgo nivel 2.

AUTORIZACIÓN PARA EL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS MODALIDAD F) INCINERACIÓN

Una vez obtenida la aprobación de Evaluación Ambiental, se debe comenzar con el trámite de autorización para el manejo de residuos peligrosos en su modalidad F) Incineración”, este trámite se identifica con el nombre de SEMARNAT-07-033-F, y es una regulación impuesta por la NOM-098-SEMARNAT-2002, la información requerida es la siguiente:

- a) Nombre o razón social de la empresa.
- b) Acta constitutiva de la empresa.
- c) Poder notarial del representante legal.
- d) Domicilio en donde se realizará el proceso de incineración.
- e) Información de los residuos a incinerar.
- f) Descripción detallada de la recepción, almacenamiento y proceso de incineración (indicando capacidad anual en ton/año).
- g) Descripción de los equipos que se utilizan en el proceso de incineración.
- h) Diagrama de flujo del proceso de incineración.
- i) Balance de materia y energía.
- j) Sistema de alimentación al incinerador.
- k) Combustibles utilizados.
- l) Sistema de control de emisiones.
- m) Descripción de las medidas de seguridad en el proceso de incineración.
- n) Descripción de los residuos generados del proceso de incineración
- o) Programa de capacitación del personal involucrado en el manejo de residuos peligrosos.
- p) Programa de prevención y atención de contingencias o emergencias ambientales y accidentes.

- q) Copia del plano ejecutivo de la planta de conjunto, distribución de las áreas, incluyendo el área de almacenamiento y del proceso de incineración.
- r) Licencia de uso de suelo.
- s) Resolución en materia de Impacto y Riesgo Ambiental emitida por esta Secretaría, según aplique.
- t) Propuesta del seguro o garantía financiera.
- u) Propuesta de protocolo de pruebas.
- v) Memoria fotográfica de equipos e instalaciones.
- w) Pago de Derechos.

LICENCIA AMBIENTAL ÚNICA

Como parte del seguimiento de trámites para la empresa interesada en operar una planta de incineración de residuos peligrosos, se debe realizar la solicitud de la Licencia Ambiental Única (LAU). La LAU es un instrumento de regulación directa, para establecimientos industriales de jurisdicción federal en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera, que establece condiciones para su operación y funcionamiento integral conforme a la legislación ambiental vigente.

En este documento se establece la obligatoriedad de la LAU para los establecimientos que realicen tratamiento de residuos peligrosos cuando están por instalarse o iniciar operaciones o cuando deben regularizarse por estar operando sin cumplir con alguno de los trámites ambientales. El formato para presentar la solicitud de la LAU se encuentra disponible en la página de trámites de la SEMARNAT, y en general debe contener la siguiente información:

Sección I: Información técnica general

- a) Antecedentes de impacto ambiental y riesgo
- b) Contingencias
- c) Diagramas de funcionamiento y descripción de procesos

Sección II: Contaminación atmosférica

- a) Puntos de generación de contaminantes
- b) Contaminantes por punto de emisión
- c) Chimeneas o ductos de descarga

Sección III: Servicios hidráulicos

- a) Aguas nacionales
- b) Datos generales de aprovechamiento de aguas

- c) Descarga de aguas residuales

Sección IV: Generación y manejo de residuos peligrosos

- a) Total de residuos generados
- b) Total de residuos peligrosos manejados dentro del establecimiento
- c) Almacenamiento de residuos peligrosos dentro del establecimiento
- d) Total de residuos peligrosos manejados fuera del establecimiento
- e) Residuos a tratar por el prestador de servicios

REGISTRO COMO GENERADOR DE RESIDUOS PELIGROSOS

Uno de los productos de la incineración, es la ceniza generada por la combustión de los residuos, según el artículo 7 de la NOM-098-SEMARNAT-2002 las cenizas y otros residuos sólidos que se generen durante los procesos de incineración, deben ser considerados como residuos peligrosos, por lo que su manejo deberá cumplir con los ordenamientos legales aplicables, este hecho genera otro trámite para la empresa, el cual es el registro como generador de residuos peligrosos. El formato se encuentra disponible en línea, siendo este el único requisito a presentar ante la Secretaría. La información que contiene este formato es la siguiente:

- a) Identificación del generador de residuos peligrosos
- b) Ubicación geográfica del generador
- c) Clasificación de los residuos peligrosos que se estime generar

Al concluir exitosamente con los cuatro tramites mencionados anteriormente, se da por entendido que el proceso de incineración tiene la capacidad de destrucción de residuos peligrosos mediante un proceso amigable con el medio ambiente, pues cumple con las regulaciones impuestas por la Nación. Cabe mencionar que una vez iniciada la operación de las instalaciones, se debe realizar un trámite adicional.

TRÁMITES ADICIONES

CÉDULA DE OPERACIÓN ANUAL

En el mismo instructivo general de la LAU, se hace referencia al trámite de la Cédula de Operación Anual (COA), la cual constituye en un reporte anual multimedios relativo a la emisión y transferencia de contaminantes ocurridos en el año calendario anterior. Su presentación forma parte de las obligaciones fijadas en la Licencia de Funcionamiento y la Licencia Ambiental Única. Se presenta por establecimiento industrial, tanto para actualizar la información sobre su operación y facilitar su seguimiento por parte de la autoridad ambiental, como para ofrecer información actualizada que contribuya a la definición de políticas ambientales por regiones prioritarias o a escala nacional.

La COA deberá entregarse en el primer cuatrimestre de cada año según lo establecido en la Licencia respectiva. La COA contempla la siguiente información básica:

- ✓ Cantidades de emisión y transferencia de sustancias contaminantes a los diferentes medios (aire, agua, suelo).
- ✓ Cantidades de transferencia de tales sustancias fuera del establecimiento sea para su tratamiento, reciclaje, reúso y disposición final, en el caso de empresas generadoras.
- ✓ Actividades de control y prevención de la contaminación y proyección de los volúmenes de contaminación para el siguiente período de reporte.
- ✓ Información sobre métodos de tratamiento in situ.

4.3.2 ÁREAS DE OPORTUNIDAD

Las áreas de oportunidad identificadas durante la revisión de la legislación ambiental están ubicadas en la información proporcionada por la LGEEPA y LGPGIR, así como en el reglamento de la ley de residuos y la NOM-098-SEMARNAT-2002, cabe destacar que las características encontradas se encuentran en la desconcentración de la información, la escasez de claridad en cuanto a especificaciones, falta de congruencia en trámites por su carencia de actualización, así como la información presentada de forma general.

La normatividad existente regula condiciones de operación y establece los límites permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes de la incineración. Sin embargo falta normatividad oficial que regule tecnologías o procesos de incineración. Además, se debe

resaltar la falta de normatividad que regule el contenido, así como los alcances del protocolo de pruebas, documento que se pide para la autorización de nuevas instalaciones de incineración de residuos peligrosos.

La publicación del primer antecedente de la NOM-098-SEMARNAT-2002 proviene del proyecto PROY-098-ECOL-2000, y desde entonces, con el nombre “Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes” no se ha contado con un instrumento específico para la incineración de residuos peligrosos, debido a que este proceso es aplicable a otras dos clasificaciones de residuos, que de igual manera deberían ser regulados de manera independiente, los cuales son la incineración de residuos sólidos municipales y residuos del tipo biológico infeccioso.

La norma es un gran apoyo para el control de este tipo de prácticas, sin embargo se debe particularizar en las características de los residuos peligrosos, y de esta manera establecer un control más eficiente del proceso y las tecnologías que pueden aplicarse en el país.

4.4 EJEMPLO DE UN CASO DE ESTUDIO EXITOSO

En la Ciudad de Taizhóu, China está situado un centro de tratamiento integral de incineración. Esta región, económicamente desarrollada reporta una generación anual de residuos peligrosos industriales de 42 000 toneladas. Dicho sistema de incineración tiene una capacidad nominal de 30 toneladas por día, típicamente un factor de 3 más pequeña que las unidades europeas. La Figura 7 muestra un diagrama esquemático del proceso.

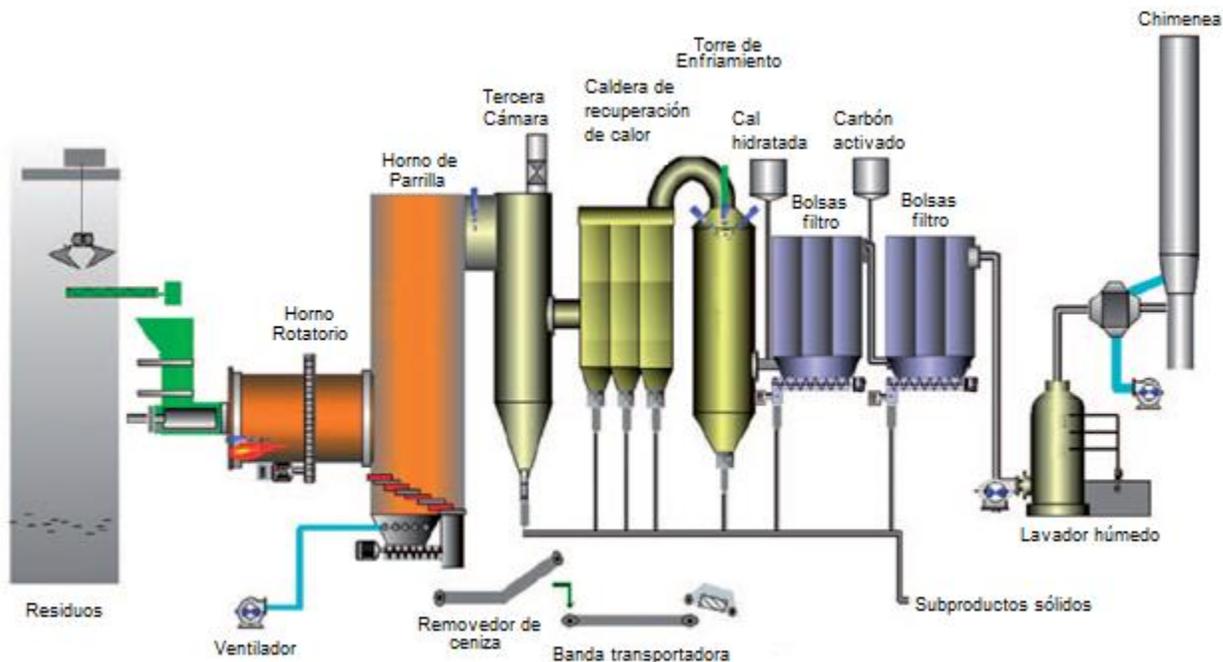


Figura 7. Diagrama esquemático de la Planta de Incineración (Ma, et al., 2011).

El sistema de incineración está compuesto por un horno rotatorio, un horno de parrilla mecánica o móvil y una cámara de postcombustión. Los residuos son levantados mediante una grúa, la cual los introduce a una tolva de alimentación, donde son transferidos al horno rotatorio mediante un alimentador hidráulico. Dentro del horno rotatorio los residuos son calentados e incinerados. El horno de parrilla está diseñado para quemar todos los residuos sólidos descargados por el horno rotatorio. Las cenizas de fondo descargadas se enfrían con agua y se remueven. Los metales ferrosos se retiran magnéticamente de las cenizas. Entonces el flujo de gas de combustión pasa a la cámara de combustión para completar la incineración.

Una caldera de recuperación de calor enfría el flujo de gases de combustión de 1100°C a 550°C. Después, el flujo pasa al precalentador de aire, elevando la temperatura del aire a 200°C y de esta manera ser alimentados al horno rotatorio y al horno de parrilla. El vapor generado se utiliza en otros procesos del centro de tratamiento.

El sistema de control de emisiones consiste en cuatro componentes básicos: una torre de enfriamiento para bajar la temperatura de los gases y pre-acondicionar de cal, seguida por unas unidades de inyección de carbón activado y cal hidratada, un sistema de filtro de mangas doble y un depurador húmedo.

La torre de enfriamiento inyecta una solución de NaOH para mitigar los gases ácidos (SO₂, HCl y HF) al mismo tiempo de que enfría súbitamente la corriente de los gases de 550 a 180°C. Para neutralizar los demás gases ácidos es inyectada cal hidratada antes del primer filtro de bolsa. Los compuestos orgánicos semi-volátiles y los metales pesados son adsorbidos por el carbón activado en el segundo filtro de bolsa y el material particulado es removido en dos etapas por el sistema de filtros de bolsa doble.

De manera subsecuente, los gases pasan al lavador húmedo donde están en continuo contacto con una solución caustica sobre anillos de cerámica, usados como material de empaque. En esta etapa, los gases de combustión son enfriados a una temperatura de 70°C. Los parámetros clave del proceso de muestran en la Tabla 13, tales como capacidad de procesamiento, valor calorífico y temperaturas, por mencionar algunas. La

Tabla 14 muestra un análisis aproximado de los residuos incinerados.

Tabla 13. Parámetros de operación de la planta de Taizhóu, China (Ma, et al., 2011).

Parámetro	Valor
Capacidad	30 ton/día
Valor calorífico de los residuos	15 000 KJ/Kg
Temperatura de salida de la segunda cámara de combustión	≥ 1 100 °C

Parámetro	Valor
Tiempo de residencia en la segunda cámara	>3s
Material sin incinerar contenidos en los residuos	<3%

Tabla 14. Caracterización de residuos incinerados en Taizhóu, China (Ma, et al., 2011).

Parámetro analítico	Valor
Análisis aproximado	
Humedad	28.9 %
Ceniza	24.1 %
Combustible (carbono fijo y materia volátil)	47 %
Análisis reciente	
Carbono	32.2 %
Hidrógeno	5.0 %
Oxígeno	5.32 %
Nitrógeno	1.6 %
Cloro	0.76 %
Sulfuro	2.08 %
Fluoruro	0.01 %
Porcentaje total	46.97 %

El flujo de gases emitido es monitoreado y medido con equipo localizado en un cuarto dedicado al lado de la chimenea. Los gases HCl, CO, CO₂, NO_x, SO₂, NH₃, H₂O y O₂ son continuamente monitoreados por un analizador multicomponente IR de chimenea, para determinar el cumplimiento con los valores límite, el resultado de sus emisiones se observan en la Tabla 15 así como los valores límite del Ministerio de Protección Ambiental de China y de la Directiva Europea.

Tabla 15. Niveles de contaminantes en las emisiones de la planta (Ma, et al., 2011).

	Salida de la Chimenea (mg Nm ⁻³)	Límites Chinos GB 18484- 2001 (mg Nm ⁻³)	Directiva –EU 2000/76/EC (mg Nm ⁻³)	Límites de la NOM-098- SEMARNAT-2002
Referencia de O ₂	11 %	11 %	11 %	7 %
Hg	0.016	0.1	0.05	0.07
CO	12	80	50	63
HCl	<5	70	10	15
HF	<1	7	1	---
NO ₂ (NO+NO ₂)	200	500	400	300
TOC	/	/	10	---
SO ₂ (SO ₂ + SO ₃)	<10	300	50	80
Cd	0.025	0.1	0.05 (Cd+Tl)	0.07
Pb	0.03	1	---	---
Sb, Cr, Sn, Cu, Mn	<0.5	4	0.5 (Incluye Pb, As, Co, Ni, V)	0.7
As, Ni	0.5	1	/	0.7
PM	<2	80	10	50
TEQ (Dioxinas, furanos)	0.05	0.5	0.1	0.2

Con el fin de obtener altos niveles de eficiencia de la incineración, así como la fiabilidad de la planta, se requiere un funcionamiento optimizado a través de un proceso de control inteligente. El sistema de control de procesos principalmente constaba de tres partes: las redes del sistema, el hardware y una plataforma de software. Está diseñado para garantizar la seguridad y fiabilidad para su incineración.

Las ventajas competitivas de este sistema de tratamiento de incineración de residuos peligrosos industriales, el cual está adecuado para las complejas características de los residuos generados en los sectores industriales de China, puede no estar sólo definido por la materia prima y la flexibilidad de producción, sino que también por su buen funcionamiento ambiental, adicionalmente, el diseño ingenieril del sistema de incineración tiene costos de capital y de operación bajos y se espera que juegue un rol importante en la solución del problema de disposición de residuos peligrosos industriales de China. Para otros países en desarrollo, el tratamiento de incineración de residuos peligrosos industriales puede ser una alternativa prometedora.

Los límites de emisión de contaminantes a la atmósfera de México están por encima de los reportados por la Unión Europea, esto puede observarse en la tabla Tabla 15. Debido a que esta práctica es más común en el continente mencionado, México debería contar con límites aún más estrictos.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La implementación de la incineración de residuos peligrosos es una actividad que debe ser de manera adecuada, con el fin de no perjudicar al medio ambiente, para cumplir con ese objetivo se proponen las acciones por atender de la Figura 8. La Tabla 16 representa una matriz de planeación con las acciones encontradas.

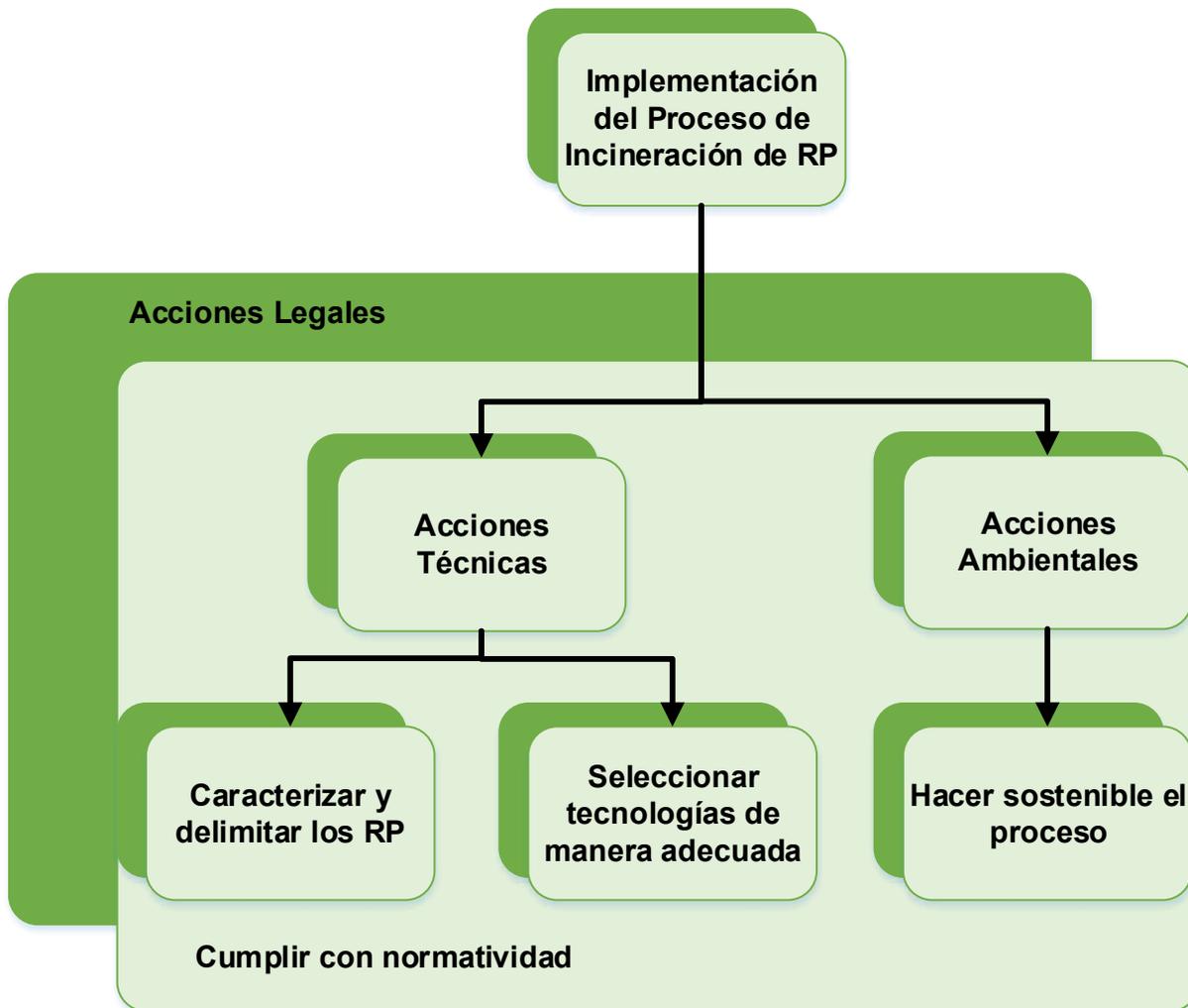


Figura 8. Acciones de Implementación del proceso de incineración

Tabla 16. Acciones por atender para implementar la Incineración limpia de RP en México (Elaboración propia)

	Indicadores y Metas	Medios de Verificación	Supuestos Importantes
Finalidad	Construcción de una planta de Incineración de RP	Operación de la planta	Crecimiento de la Industria generadora de RP
Propósito	Implementar la Incineración como método de disposición final de RP	Aumento de la capacidad instalada en el país de la incineración	Actualización del Inventario de empresas autorizadas para la incineración de RP
Resultados	Minimización de los RP enviados a confinamiento	Actualización del registro del manejo de RP	Actualización continua del registro de manejo
Actividades	<p>Técnicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caracterización y delimitación de la materia prima • Selección de tecnología de incineración adecuada <p>Ambientales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Implementación de un proceso de recuperación energética <p>Legales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Actualización de la NOM-098-SEMARNAT-2002 • Realización de normatividad para protocolo de pruebas • Iniciar un registro del manejo de RP 	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterización por parte de un laboratorio certificado • Disminución de peligrosidad y volumen de los RP • Disminución de costos de operación • Publicación en el Diario Oficial de la Nación • Inicio de registro del manejo de RP por parte de la SEMARNAT 	<ul style="list-style-type: none"> • Delimitación de la industria proveedora de la materia prima • Optimización adecuada del proceso • Atención al plan nacional de desarrollo de la nación • Incremento de la necesidad del registro de manejo de RP

5.1 ASPECTOS TÉCNICOS A RESOLVER

Beneficios de la caracterización y delimitación de los residuos

A continuación se presentan los beneficios que se pueden obtener al realizar adecuadamente esta práctica:

- Simplificación del diseño del proceso de incineración y limpieza de gases
- Reducción del costo de las tecnologías de lavado de gases
- Reducción en la emisión de gases contaminantes
- Optimización adecuada del proceso de incineración
- Mayor eficiencia del proceso

Propuesta de caracterización de Residuos Peligrosos

Como estrategia general en estado de recomendación para un proyecto de una planta de incineración de residuos peligrosos, se debe conocer perfectamente la caracterización general, física y química de los residuos que se van a recibir e introducir al proceso, los parámetros mínimos necesarios se encuentran en la Tabla 17:

Tabla 17. Caracterización de residuos peligrosos

Caracterización general	Características químicas	Características físicas
✓ Fuente de residuo	✓ Análisis inmediato y elemental: C, H, O, N, S y Br	✓ Estado físico
✓ Tipo y características de contenedor de los residuos	✓ Metales pesados: Hg, Pb, Cd, Cu, Ni, Cr, As, Se, Be, asbestos	✓ Fracciones en peso de los componentes
✓ Precauciones de manejo	✓ Compuestos especiales: benceno, PCB's.	✓ Calor específico
✓ Naturaleza del riesgo	✓ Temperatura de la llama	✓ Necesidad de oxígeno
✓ Calidad del residuo (Homogéneo o Heterogéneo)	✓ Contenido en volátiles	✓ Contenido de humedad
✓ Cambio de composición con el tiempo		✓ Productos de la combustión
		✓ Contenido y características de las cenizas
		✓ Condiciones tiempo-temperatura de descomposición de los residuos

Beneficios de la selección adecuada de tecnologías de incineración

Es necesario promover el uso de tecnologías nuevas y eficientes para incinerar residuos, hoy en día no existe una norma que regule la elección de una tecnología, sin embargo los criterios de diseño del proceso de incineración, deben basarse en los límites de contaminantes impuestos por la Secretaría, los beneficios de realizar una buena elección de tecnologías son:

- ✓ Asegurar la mayor destrucción de los residuos
- ✓ Minimizar equipos de pretratamiento de materia prima
- ✓ Minimizar costos de inversión, operación y mantenimiento

Propuestas para la selección de equipos

Las tecnologías más empleadas para este tratamiento son (Unión Europea, 2011):

- ✓ Incineradores de solera múltiple
- ✓ Hornos rotatorios
- ✓ Hornos de lecho fluidizado
- ✓ Horno de parrilla móvil
- ✓ Horno de hogar fijo

A continuación se proponen criterios base de selección de tecnologías, que pueden ser utilizados en un proceso de selección:

Criterios propuestas del área técnica:

- ✓ **Temperatura de operación en cámaras:** La temperatura es un parámetro importante que garantiza la destrucción de residuos.
- ✓ **Tiempo de residencia en cámara dos:** Tiempo que deben permanecer los residuos dentro de la cámara dos de combustión de acuerdo a la NOM- 098-SEMARNAT-2002.
- ✓ **Tipo de residuos:** Evalúa el tipo de residuos que la tecnología puede procesar, es decir si procesa RS-I-RP.

- ✓ **Tratamiento previo:** Estima la complejidad del procesamiento que requieren los residuos para formar la mezcla que alimentará la cámara de incineración, particularmente si deben reducir su tamaño y en qué grado.
- ✓ **Ajuste de capacidad:** Evalúa si los hornos pueden ser adaptados a las proyecciones de procesamiento diario requeridas en el caso de estudio.
- ✓ **Turbulencia:** La incineración puede ser optimizada cuando se mezclan los residuos, el aire y el combustible durante el proceso, la turbulencia es el criterio que cuantifica este comportamiento.
- ✓ **Mantenimiento:** Tipo de limpieza y cuidado que debe tener el equipo para su buen desempeño.
- ✓ **Servicios auxiliares:** Determina si la tecnología requiere servicios auxiliares adicionales o equipo especializado complementario para su operación, por ejemplo bombas, atomizadores o motores adicionales a la infraestructura del horno.
- ✓ **Eficiencia de destrucción:** Relación entre materia prima alimentada y materia destruida reportada por los fabricantes.

Los criterios propuestos del área ambiental son los siguientes:

- ✓ **Manejo de cenizas:** Las cenizas de fondo generadas en la primera cámara de combustión se componen principalmente de materiales inertes. Es deseable que estas cenizas se recolecten de manera independiente a los productos del sistema de control para facilitar su estabilización antes de su disposición final.
- ✓ **% de RS-I-RP remanentes:** Estima los remanentes de RS-I-RP al final del proceso, con datos proporcionados por los fabricantes.

El criterio económico sólo es una propuesta conceptual, debido a que es necesario un análisis exhaustivo de los costos

- ✓ **VPC:** Analiza la interacción entre los costos de inversión, costos de operación y los costos de mantenimiento durante el horizonte del proyecto. El valor presente de costos más conveniente es el que resulta con menor valor.

El ANEXO 5 contiene una tabla comparativa con información condensada de las tecnologías de incineración, se reportan las características sobresalientes que se pueden evaluar con los criterios mencionados anteriormente.

5.2 ASPECTOS AMBIENTALES A RESOLVER

Beneficios de una implementación sustentable

El proceso de incineración limpia de residuos peligrosos puede implementar un bloque de recuperación energética, proveniente de los gases de combustión, los beneficios serían:

- ✓ Pre calentamiento de aire para la combustión
- ✓ Disminución del consumo energético de la planta
- ✓ Disminución de la quema de combustibles no renovables
- ✓ Disminución de la temperatura de los gases de combustión

Propuesta de recuperación energética

La implementación de un equipo de ciclo combinado (generación de vapor y electricidad) es una alternativa que ofrece una eficiencia de hasta el 80% de recuperación energética. Este trabajo no tiene el alcance de hacer una propuesta más elaborada de este equipo.

5.3 ASPECTOS LEGALES A RESOLVER

Beneficios del cumplimiento de la normatividad asociada a la actividad

El cumplimiento de la ley es inherente en cualquier actividad industrial dentro de la nación, el éxito de esta premisa recae en el hecho de haber diseñado un proceso amigable con el medio ambiente, los beneficios son:

- ✓ Obtener el permiso de construir la planta
- ✓ Contribuir al sistema de gestión de residuos peligrosos
- ✓ Aumentar la aceptación social del proyecto
- ✓ Obtener la licencia de operación

El diagrama de Gantt para realizar los trámites y obtener el permiso de construcción se observa en la Figura 9, para su elaboración se consideró una fecha arbitraria. La actividad 3, “Procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental” y la Actividad 4 “Licencia de uso de suelo”, son únicas en calidad de prerrequisito para la Actividad 6 “Autorización del manejo de RP, en su modalidad F) Incineración”. Los días pueden aumentar 10 días o disminuir 20, dependiendo de la respuesta de las entidades administrativas encargadas.

Debido a la falta de claridad en cuanto a la presentación de formatos, se puede consultar los ANEXO 2 y ANEXO 3. Los alcances de esta tesis no contemplan la generación de propuestas más delimitadas, debido a que para tal fin es necesario realizar una evaluación de factibilidad técnica, económica y ambiental.

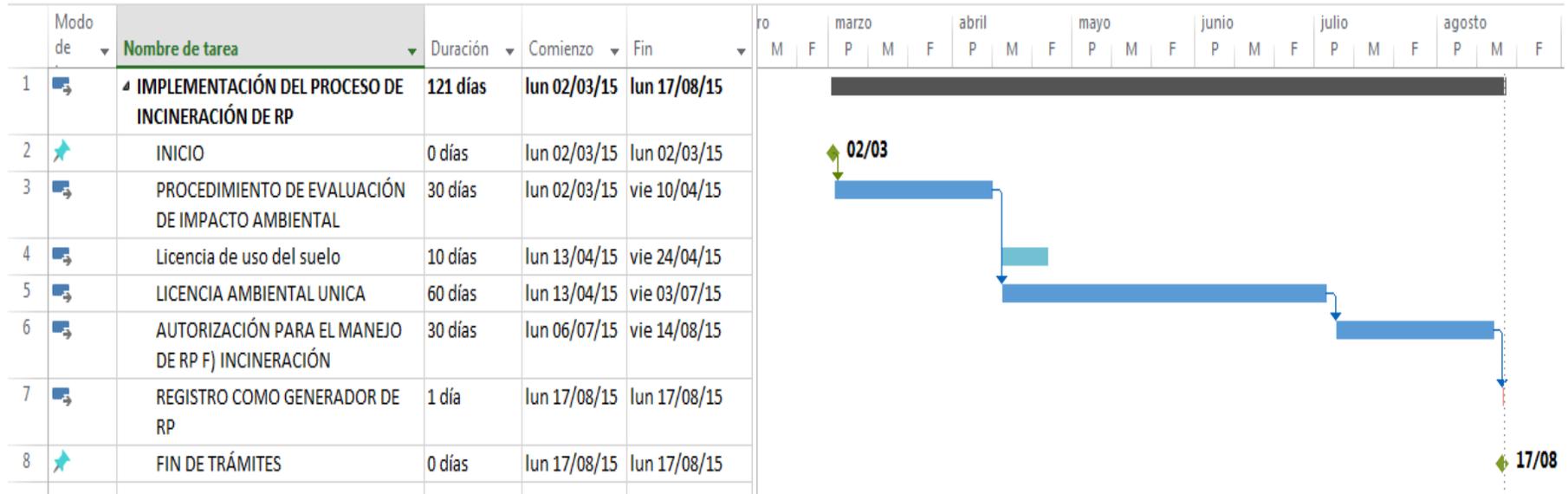


Figura 9. Gantt para realizar los trámites de implementación del proceso de incineración limpia en México

Propuesta legal

En este apartado recaen las propuestas técnico-ambientales, sin embargo se hace referencia a la falta de información disponible por parte de las autoridades para atender los formatos de manera adecuada, para la realización de los trámites pertinentes, por lo que es necesario lo siguiente:

- ✓ Actualización de la NOM-098-SEMARNAT-2002 por cambio de trámite
- ✓ Realización de normatividad para regular la entrega del protocolo de pruebas
- ✓ Realización de iniciativa para generar estadísticas nacionales del manejo de residuos peligrosos

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

A través de este trabajo se logró identificar las acciones necesarias para la implementación de un proyecto de incineración de residuos peligrosos, con el objetivo de que ejerzan como una guía de conceptualización, para lo cual se realizó un análisis de la situación nacional de los residuos peligrosos, de las alternativas tecnológicas que se tienen del proceso de incineración y de la legislación nacional vigente en la materia.

Se determinó que la composición de la mezcla de residuos es una variable crítica que impacta sobre todo el proceso, debido a que de ella depende la complejidad del diseño, los costos de inversión y la calidad de los gases de combustión a la salida del sistema. De forma ideal, se prevé que los residuos a incinerar contengan una matriz fundamentalmente orgánica en un rango de 14-20 % y con un contenido inferior al 60% de agua, un poder calorífico de por lo menos 11.6 GJ/ton y preferentemente mayor a 18.5 GJ/ton, además debe evitarse la incineración de residuos con una alta concentración de sulfuros, con contenido de metales pesados o hidrocarburos aromáticos poli-cíclicos.

Los gases emitidos a la atmósfera son un objetivo de condición de operación, estos gases deben apegarse a los estándares impuestos en la norma de incineración de residuos, debido a que impactan directamente en el ambiente y en la aceptación social de este tipo de proyectos. Los contaminantes de mayor interés con límite impuesto por la normatividad, son los gases de efecto invernadero CO (63 mg/m³) y NO_x (300 mg/m³); los gases ácidos HCl (15 mg/m³) y SO₂(80 mg/m³); así como las dioxinas y furanos (0.2 mg/m³), los cuales son subproductos de una combustión incompleta.

La tecnología de incineración de residuos peligrosos más utilizada y recomendada por la bibliografía especializada, es el horno rotatorio, debido a que ofrece ventajas en la capacidad de procesamiento, la cual se encuentra en el intervalo de 10 a 350 ton/día, siendo que la bibliografía recomienda líneas de proceso de 10 a 25 ton/ día. Para capacidades más elevadas, como es el caso de la incineración de residuos municipales, se recomienda el uso de hornos de charolas.

La emisión de los gases de combustión está regulada por la NOM-098-SEMARNAT-2002, los niveles de gases contaminantes deben estar por debajo del límite establecido por esta norma, que en comparación con la normatividad de la unión europea, son menos estrictos, y para este caso, la bibliografía especializada recomienda un tren de tratamiento que incluye un precipitador electrostático, un Quencher para enfriamiento súbito y un depurador del tipo húmedo.

El ahorro de energía es una estrategia clave en este tipo de instalaciones y que tiene como consecuencia la reducción de emisiones de gases invernadero. La eficiencia más alta que puede alcanzar el proceso es del 85% empleando un ciclo combinado para generar calefacción y electricidad, en México no existe estructura para la distribución de calefacción en los hogares, debido a que no es una necesidad para sus habitantes. Por lo que se recomienda otra alternativa que consiste en generar vapor en una caldera, alcanzando una eficiencia total del 80%.

En lo que se refiere a la situación actual del manejo, se identificó que el sistema de manejo es deficiente y que el país está aún en vías de desarrollo para alcanzar un nivel de gestión adecuado. Dentro de los puntos más críticos se señala la falta de información estadística confiable en cuanto a generación de residuos peligrosos, así como la carencia de inventarios de procesamiento de los mismos.

Los generadores potenciales identificados por la PROFEPA superan a los registrados por la Secretaría, ya que se estiman más de 160 mil generadores, mientras que los reportes solo indican 86 mil generadores de residuos peligrosos, este déficit repercute en la credibilidad del inventario nacional de generación de residuos peligrosos, manifestando que esta cantidad es mayor a los 2.03 millones de toneladas que se reportan dentro del periodo 2004 al 2013.

Esta información es indispensable para evaluar la viabilidad de implementación de alternativas de tratamiento de residuos peligrosos. Además, Se calculó una capacidad de incineración de residuos peligrosos de 27,800 toneladas anuales, la que se consideró insuficiente debido a que se estimó una generación de residuos peligrosos susceptibles de incineración de 42 mil toneladas anuales a nivel nacional.

Las normas que aplican de forma directa al proceso de incineración de residuos peligrosos son la NOM-052-SEMARNT-2005 empleada para la determinación y clasificación de los residuos peligrosos, y la NOM-098-SEMARNAT-2002 que regula la incineración de residuos, especificando las condiciones de operación y estableciendo los límites de emisión de contaminantes.

La LGEEPA decreta la obligación de obtener la autorización para construir y operar una planta de eliminación de residuos peligrosos, mediante la presentación de una Manifestación de Impacto Ambiental que ejerce como parte del Procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental, con el objetivo de analizar y describir las condiciones ambientales anteriores a la realización del proyecto y la finalidad de evaluar los impactos potenciales que la construcción y operación de dicha obra o la realización de las actividades podría causar al ambiente así como definir y proponer las medidas necesarias para prevenir, mitigar o compensar esas alteraciones.

La Licencia Ambiental Única es otro trámite necesario para la operación del proceso, que forma parte de la regulación directa, para establecimientos industriales de jurisdicción federal en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera, que establece condiciones para su operación y funcionamiento integral conforme a la legislación ambiental vigente.

También es necesario obtener la autorización para el manejo de residuos peligrosos en su modalidad f) Incineración, este trámite lleva el nombre de SEMARNAT-07-033-F, y es una regulación impuesta por la NOM-098-SEMARNAT-2002. Finalmente, es necesario el registro de la industria como generadora de residuos peligrosos, debido a que la misma norma establece que las cenizas y efluentes de la limpieza de gases son subproducto del proceso y que deben considerarse como residuos peligrosos.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

Agamuthu P., K. M. K. F. S. H., 2009. Drivers of sustainable waste management in Asia. *Waste Management & Research*, p. 625–633.

Anon., 2012. SEMARNAT. [En línea] Available at: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/Compendio_2012/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServletb420.html

Anon., s.f. *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*. s.l.:s.n.

Asakura, H., Matsuto, T. & Inoue, Y., 2010. Adopted technologies and basis for selection at municipal solid waste landfill facilities constructed in recent years in Japan. *Waste Management & Research*, p. 685–694.

Buekens, A., 2013. *Incineration Technologies*. New York: SpringerBriefs in Applied.

Caneghem, J. V. y otros, 2012. Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, pp. 551-582.

Chen, J. C., Huang, J. S., Chen, C. M. & Guo, J. S., 2008. Emission characteristics of PAHs, benzene and phenol group hydrocarbons in O2/RFG waste incineration processes. *Fuel*, p. 2787–2797.

Clerens Consulting, 2012. *Energy recovery Efficiency in Municipal Solid Waste-to-Energy plants in relation to local climate conditions*, s.l.: European Commission.

Copenhagen Capacity, 2012. *Denmark: We Know Waste*. [En línea] Available at: <http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2001/87-7944-863-1/pdf/87-7944-859-3.pdf>.

Cortinas de Nava, C., 2006. *Regulación de Residuos Peligrosos en México*. México: SEMARNAT.

Defra, D. f. E. F. & R. A., 2013. *Incineration of Municipal Solid Waste*, UK: s.n.

Demirbas, A., 2011. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Conversion and Management*, p. 1280–1287.

Díaz Blanco, M. J., 2008. *Universidad de Huelva*. [En línea] Available at: <http://www.uhu.es/sevirtual/ocw/politecnico/tecnicas-tratamiento-contaminacion/material/008.pdf>

El Banco Mundial, 2013. *Indicadores*. [En línea] Available at: <http://datos.bancomundial.org/indicador>

EPA, 2009. *United States Environmental Protection Agency*. [En línea] Available at: <http://cfpub.epa.gov/eroe/index.cfm?fuseaction=detail.viewPDF&ch=48&IShowInd=0&subtop=228&lv=list.listByChapter&r=239786>

EPA, 2011 a. *United States Environmental Protection Agency*. [En línea] Available at: <http://www.epa.gov/osw/inforesources/data/br11/national11.pdf>

EPA, 2011 b. *Environmental Protection Agency. The National Biennial RCRA Hazardous Waste Report*, United States: s.n.

European Comisión, 2010. *Eurostat*. [En línea] Available at: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database

European Commission, 2014. *Eurostat*. [En línea] Available at: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Waste_statistics

Fuentes, N., 2014. *Universidad Iberoamericana*. [En línea] Available at:

http://www.uia.mx/departamentos/dpt_estudinterna/dialogo/economia/ralacion%20comecial.html

Gobierno de la República, 2007. *Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012*, México: s.n.

Gobierno de la República, 2013. *Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018*, México: s.n.

González Hernández, E. E., 2012. *SEMARNAT*. [En línea].

Grosso, M., Motta, A. & Rigamonti, L., 2010. Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Management*, p. 1238–1243.

Hernández Islas, S., 2010. *Tesis de Maestría "Determinación de una mezcla óptima a incinerar, de residuos peligrosos y de manejo especial; que facilite su tratamiento térmico y contribuya a disminuir los niveles de emisiones de contaminantes al ambiente"*. D.F.: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.

IDEAM, 2011. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. [En línea] Available at: https://www.siac.gov.co/documentos/DOC_Portal/DOC_Siac/20130626_Informe_generacion_manejo_respel_2011.pdf

IEA, 2012. *International Energy Agency*. [En línea] Available at: http://www.iea.org/country/map_indicators/index.html

IMP, 2011. *Instituto Mexicano del Petróleo*. [En línea] Available at: <http://www.imp.mx/productos/?imp=MAMB&%20esp=0401&%20cs=2>

INECC, I. N. d. E. y. C. C., 2012. *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*, México, D.F.: s.n.

INEGI, 2012. *Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos*. México: s.n.

Jaime Paredes, D. A., 2007. *Instituto Nacional de Ecología*. [En línea]
Available at: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/35/manejo.html>

Jordão da Silva, L., Chaves Alves, F. & Pessôa de França, F., 2012. A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries. *Waste Management & Research*, p. 1016–1030.

Kikuchi, R. & Jacques, V., 2013. Environmental impacts of residual Municipal Solid Waste incineration: A comparison of 110 French incinerators using a life cycle approach. *Waste Management*, p. 2781–2788.

Kothari, R., Tyagi, V. & Pathak, A., 2010. Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 3164–3170.

Lybæk, R. B., Klemmensen, B., Li, R. & Liu, S., 2010. *Roskilde University Digital Archive*. [En línea]
Available at:
<http://diggy.ruc.dk/bitstream/1800/5513/1/Municipal%20Solid%20Waste%20Management%20in%20China.pdf>

Ma, P. y otros, 2011. Industrial hazardous waste treatment featuring a rotary kiln and grate furnace incinerator: a case study in China. *Waste Management & Research*, p. 1108–1112.

METSO, 2014. [En línea]
Available at: <http://www.metso.com/miningandconstruction/MCTwArticles.nsf/WebWID/WTB-110103-22575-2CDE6?OpenDocument#.VliI2DGG8dx>

MJ Bradley & Associates, 2005. *Mejor tecnología disponible para el control de la contaminación atmosférica en América del Norte: directrices para el análisis y estudios de caso.*, Montreal, Quebec, Canadá: Elaborado para la: Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) de América del Norte.

Münster, M. & Meibom, P., 2011. Optimization of use of waste in the future energy system. *Energy*, pp. 1612-1622.

Ning, S. K., Chang, N. B. & Hung, M. C., 2013. Comparative streamlined life cycle assessment for two types of municipal solid waste incinerator. *Journal of Cleaner Production*, pp. 56-66.

Pavlas, M., Tous, M., Bébar, L. & Stehlík, P., 2010. Waste to energy - An evaluation of the environmental impact. *Applied Thermal Engineering*, pp. 2326-2332.

PROFEPA, 2010. *Control de Residuos Peligrosos en México*. [En línea] Available at: http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/1370/1/mx/control_de_residuos_peligrosos.html [Último acceso: Abril 2014].

PROFEPA, 2014. *Acerca de PROFEPA*. [En línea] Available at: http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/1161/1/mx/acerca_de_profepa.html [Último acceso: Marzo 2014].

Psomopoulos, C., Bourka, A. & Themelis, N. J., 2009. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, p. 1718–1724.

RCRA, 1999. *Introduction to: Hazardous Waste Incinerators*, United States: Superfund & EPCRA Hotline Training Module.

SEMARNAT, 2010 b. *Integración y Actualización del Inventario Nacional de Generación de Residuos Peligrosos*, México: s.n.

SEMARNAT, 2010 b. *Presidencia de la República*. [En línea] Available at: <http://calderon.presidencia.gob.mx/2010/08/presenta-la-semarnat-el-inventario-nacional-de-generacion-de-residuos-peligrosos/>

SEMARNAT, 2013. [En línea] Available at:

<http://web2.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/materialesactividades/Paginas/ResPel.a.spx>

SEMARNAT, 2014. [En línea]
Available at: <http://tramites.semarnat.gob.mx/index.php/empresas-autorizadas>

SEMARNAT, s.f. *NOM-098-SEMARNAT-2002*. s.l.:s.n.

Tabasova, A. y otros, 2012. Waste-to-energy technologies: Impact on environment. *Energy*.

Theodore, L. & Reynolds, J., 2000. *Introduction to Hazardous Waste Incineration*. Segunda ed. United States of America: Wiley.

UNAM, I. I., 2009. *Estudio de Evaluación de Tecnologías Alternativas o Complementarias para el Tratamiento o Disposición Final de los RSU*. [En línea]
Available at:
http://www.cmic.org/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/publicaciones_conagua/RESIDUOS%20PELIGROSOS/EST-EVA2009.pdf

Unión Europea, 2011 a. *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos. Documento BREF.*, Madrid, España.: s.n.

United Nations, 2011 b. *Statics Division*. [En línea]
Available at: <http://unstats.un.org/unsd/environment/hazardous.htm>

UTJ, 2009. *Universidad Tecnológica de Jalisco*. [En línea]
Available at: http://www.utj.edu.mx/exu/documentos_anteriores/conf04.pdf

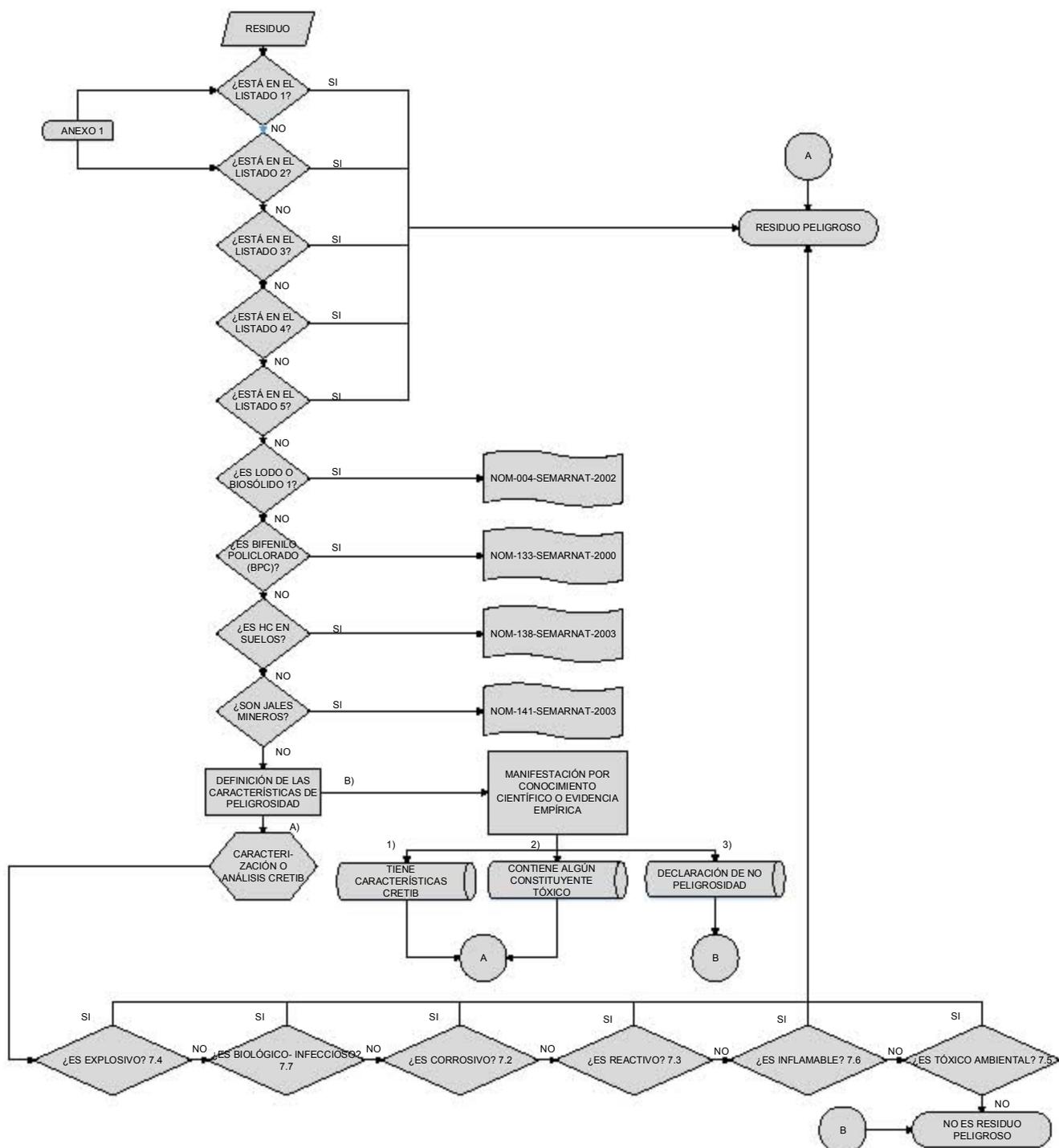
Valderrábano Almegua, M. L., Trujillo Flores, M. M. & Castro Campos, J., 2012. *Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo*. [En línea]
Available at:
http://www.ciiemad.ipn.mx/Eventos/Documents/pdf/Memorias_Coloquio_Medio_Ambiente/08_mvalderrabano_mtrujillo_jcastro.pdf

World Bank Group, 2014. *The World Bank*. [En línea]
Available at: <http://www.worldbank.org/en/country/china/overview>

Young, G. C., 2010. *Municipal solid waste to energy conversion processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc..

Zavala Hernández, R., 2012. *Norteamérica*. [En línea]
Available at: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-35502012000300002&script=sci_arttext

ANEXO 1. Procedimiento para determinar si un residuo es peligroso



ANEXO 2. Trámite SEMARNAT-07-033-F

Autorización para el manejo de residuos peligrosos. Modalidad F: Incineración.

Sin la realización de este trámite, los particulares no podrían obtener autorización para realizar la incineración de residuos peligrosos. Este trámite se fundamenta en los Artículos 50 y 80 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos además, en los Artículos 48, 49 fracción VI, 50, 51 fracción I, Décimo segundo transitorio del Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. El trámite tiene un monto de \$45,715.00 (sin IVA).

Para realizar el trámite se deberá presentar la solicitud con la información siguiente, el formato es libre:

- ✓ Identificación de cada uno de los residuos peligrosos que se pretenden manejar.
- ✓ La capacidad de almacenamiento para los residuos peligrosos dentro de las instalaciones antes de su incineración.
- ✓ La propuesta de seguros o garantías financieras.
- ✓ La información de soporte técnico de procesos o tecnologías a los que se someterán los residuos peligrosos, así como elementos de información que demuestren, en la medida de lo posible, que se propone la mejor tecnología disponible y económicamente accesible, así como las formas de operación acordes con las mejores prácticas ambientales.
- ✓ La ubicación de las instalaciones expresada en coordenadas geográficas.
- ✓ Indicar los combustibles utilizados para la incineración de residuos, incluyendo su almacenamiento y forma de alimentación durante la operación.
- ✓ Indicar el sistema de alimentación de residuos peligrosos, así como las operaciones realizadas en esta actividad.
- ✓ Clave Única de Registro de Población, en caso de personas físicas.
- ✓ El tipo de almacenamiento, envasado o a granel.
- ✓ Indicar el tiempo de residencia de los gases de combustión en el proceso.
- ✓ Las capacidades nominal y de operación, anuales, de los equipos a instalar.

- ✓ Nombre y firma del representante legal de la empresa.
- ✓ Indicar las concentraciones de los contaminantes que genera/emite el equipo durante el proceso de incineración.
- ✓ Las temperaturas de proceso.
- ✓ Descripción de la actividad que se pretenda realizar de acuerdo con lo establecido en el artículo 49 del Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
- ✓ Número de la autorización en materia de impacto ambiental, en el caso de que la actividad sea de las consideradas en el artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
- ✓ La inversión estimada del proyecto.
- ✓ Las acciones a realizar cuando arriben los residuos peligrosos a la instalación, incluyendo las de descarga y pesaje de los mismos, y aquéllas que se realicen para confirmar la información de la descripción e identificación de cada uno de los residuos peligrosos, así como los movimientos de entrada y salida de la zona de almacén.
- ✓ La cantidad estimada de los residuos que se generará.
- ✓ La eficiencia del equipo.
- ✓ La eficiencia de destrucción de los residuos que puede alcanzar el sistema.
- ✓ El proceso que se empleará para incinerar los residuos peligrosos.
- ✓ La fecha de inicio de operaciones.
- ✓ Descripción de cada uno de los residuos peligrosos que se pretenden manejar, donde se indiquen sus características físicas, químicas o biológicas.
- ✓ La capacidad anual estimada de las instalaciones en donde se pretende llevar a cabo la actividad de manejo.
- ✓ Las medidas de seguridad implementadas en todo el proceso.
- ✓ Cantidad anual estimada de manejo de cada uno de los residuos peligrosos.
- ✓ Indicar los parámetros de control del proceso.
- ✓ Las características de los residuos generados durante la operación de manejo.
- ✓ Nombre y firma del representante legal de la empresa.
- ✓ El manejo que se dará a los residuos generados.

-
- ✓ Número de autorización del Programa de Accidentes en materia de riesgo ambiental, cuando la actividad sea considerada altamente riesgosa.
 - ✓ Domicilio o dirección electrónica para recibir notificaciones.
 - ✓ La descripción de los equipos a emplear en la actividad de manejo, detallando sus sistemas de control.
 - ✓ Indicar el sistema de control y monitoreo de emisiones, incluyendo su operación y puntos de muestreo.
 - ✓ En el apartado de Datos generales de la persona, que incluyan nombre, denominación o razón social, domicilio, teléfono, fax, el domicilio o dirección electrónica para recibir notificaciones y ubicación de las instalaciones expresada en coordenadas geográficas, el solicitante deberá indicar la información que clasifique como confidencial en términos de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública Gubernamental.

Documentos requeridos para enviar con la solicitud:

- ✓ Comprobante de pago de derechos.
- ✓ Copia de identificación oficial del solicitante o del acta constitutiva de la moral cuyo objeto social ampare las actividades que pretende desarrollar.
- ✓ Programa de prevención y atención de contingencias o emergencias ambientales y accidentes, el cual contendrá la descripción de las acciones, medidas, obras, equipos, instrumentos o materiales con que se cuenta para controlar contingencias ambientales derivadas de emisiones descontroladas, fugas, derrames, explosiones o incendios que se puedan presentar en todas las operaciones que realiza la empresa como resultado del manejo de residuos peligrosos.
- ✓ El diagrama de flujo del proceso, indicando los puntos donde se generen emisiones a la atmósfera, descargas de agua residuales, subproductos, residuos o contaminantes, incluyendo sus volúmenes de generación en congruencia con el balance de materia.
- ✓ Copia de la autorización en materia de impacto ambiental.

-
- ✓ Copia de la autorización de uso de suelo expedida por la autoridad competente. Esta autorización podrá presentarse condicionada a la autorización federal.
 - ✓ Copia del plano del proyecto ejecutivo de la planta en conjunto, el cual debe indicar la distribución de las áreas, incluyendo el almacén de residuos peligrosos recibidos para su manejo y el área de manejo (incineración) de residuos peligrosos.
 - ✓ El balance de materia y energía.
 - ✓ La propuesta de protocolo de pruebas específico para esta actividad.
 - ✓ Memoria fotográfica del equipo e instalaciones, cuya autorización se solicita.
 - ✓ Documento jurídico que acredite al representante legal.
 - ✓ Programa de capacitación del personal involucrado en el manejo de residuos peligrosos, en la operación de equipos, medios de transporte, muestreo y análisis de los residuos, así como otros aspectos relevantes que el promovente haya incorporado.

Información adicional importante que se debe conocer al momento de ingresar el trámite:

- ✓ En caso de mencionar cantidades o volúmenes de residuos peligrosos emplear unidades de toneladas o metros cúbicos según corresponda.
- ✓ La identificación de los residuos peligrosos se realizará conforme a la NOM-052-SEMARNAT-2005, según sea el caso.
- ✓ Los planos de las instalaciones requeridos deben ser elaborados a una escala adecuada y presentarse de tal forma que sea posible apreciar su contenido e información.
- ✓ La información de soporte técnico de los procesos o tecnologías a los que se someterán los residuos peligrosos, así como otros elementos de información deben presentarse preferentemente en idioma español.
- ✓ Lo previsto en este trámite aplica para la solicitud de autorización para desarrollar procesos de pirolisis, plasma y gasificación de residuos peligrosos.
- ✓ El solicitante señalará la información que clasifique como confidencial en términos de la LFTAIPG.

- ✓ El nombre y firma del representante legal de la empresa se podrá sustituir con el número de RUPA.
- ✓ Las propuestas de seguros o garantías financieras que se requieran, deben observar los artículos 76 y 77 del RLGPGIR.

Respecto a la autorización de uso de suelo, se precisa lo siguiente:

- ✓ Podrá presentarse si está condicionada a la obtención de la autorización federal.
- ✓ Solicitar la autorización federal a fin de tramitar la autorización de uso de suelo correspondiente.

En la resolución de la solicitud, se considerarán los siguientes criterios

- ✓ La actividad que pretende ser autorizada debe corresponder con la definida en la Ley y su Reglamento.
- ✓ Todos los datos de información deben corresponder con los documentos que acompañen al trámite.
- ✓ Es indispensable suministrar a esta Dependencia la información de soporte técnico de los procesos o tecnologías a los que se someterán los residuos peligrosos.
- ✓ El balance de materia, el balance de energía, el diagrama de flujo y la descripción del proceso deben ser correspondientes y se debe señalar la base de cálculo correspondiente.
- ✓ Mientras no se emita la Norma Oficial Mexicana sobre protocolos de pruebas, la evaluación se realizará con base en lo detallado en el artículo transitorio décimo segundo del RLGPGIR.
- ✓ Tratándose de incineración se especificarán las medidas para dar cumplimiento a las normas oficiales mexicanas que se expidan de conformidad con los Convenios Internacionales de los que México sea parte.
- ✓ La Secretaría podrá imponer restricciones a la incineración que estipulen grados de eficiencia y eficacia que deben alcanzar los procesos y los parámetros ambientales que deben cumplirse a fin de prevenir y reducir la liberación al ambiente de sustancias contaminantes, particularmente las tóxicas. La alimentación de residuos

peligrosos al proceso de incineración también podrá restringirse, cuando se defina que dichos residuos peligrosos son susceptibles de ser valorizados mediante otros procesos disponibles y éstos sean ambientalmente eficaces, tecnológicamente y económicamente factibles.

ANEXO 3. Licencia Ambiental Única

La LAU es un instrumento de regulación directa, para establecimientos industriales de jurisdicción federal en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera, que establece condiciones para su operación y funcionamiento integral conforme a la legislación ambiental vigente, permite coordinar en un solo proceso la evaluación, dictamen y seguimiento de las obligaciones ambientales de dichos establecimientos en materia de trámites de impacto ambiental y riesgo, emisiones a la atmósfera y generación y tratamiento de residuos peligrosos.

Es obligatoria para establecimientos de jurisdicción federal en materia de atmósfera, nuevos o que deban regularizarse. Se emite por única vez. Deberá renovarse por cambio de giro o de localización. Deberá actualizarse por aumento de la producción, ampliación de la planta o cambio de razón social.

En correspondencia con el enfoque de la LAU, la Cédula de Operación Anual (COA) se constituye en un reporte anual multimedios relativo a la emisión y transferencia de contaminantes ocurridos en el año calendario anterior. La COA genera información anual multimedios sobre la emisión y transferencia de contaminantes, da seguimiento a la operación del establecimiento, permite actualizar, si es el caso, las condiciones de licenciamiento, apoya la toma de decisiones en materia de protección ambiental y contribuye a la formulación de criterios y políticas ambientales.

Conforme a los Artículos 4o.; 5o., Fracción XII; 7o., Fracción III; 8o. Fracción III; 9o., 111 bis y 112, Fracción I, de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) son fuentes fijas de jurisdicción federal en materia de prevención y control de la contaminación a la atmósfera, los establecimientos industriales que se encuentran comprendidos en los siguientes sectores:

1. Petróleo y petroquímica
2. Química
3. Pinturas y tintas
4. Metalúrgica (incluye la siderúrgica)
5. Automotriz
6. Celulosa y papel
7. Cemento y cal
8. Asbesto
9. Vidrio
10. Generación de energía eléctrica
11. Tratamiento de residuos peligrosos

En el caso de establecimientos nuevos y conforme a las disposiciones legales aplicables, el responsable del establecimiento contará con un período inicial, por un máximo de seis meses, para la puesta a punto de los procesos, maquinaria y equipos, a fin de garantizar que la operación de los mismos cumple con los requisitos legales aplicables. Para ello, deberá notificar al INE la fecha de inicio de operaciones. Además, en este lapso deberá realizar los protocolos de pruebas a que esté obligado de acuerdo con la normatividad vigente, esto es, según el caso:

- Monitoreo y análisis de emisiones a la atmósfera.
- Muestreo y análisis de aguas residuales.
- Pruebas de tratamiento de residuos peligrosos.

Para requisitar la Solicitud de Licencia Ambiental Única (Solicitud LAU) se deberán atender escrupulosamente las indicaciones que figuran en el Formato LAU. Así, también, se deberán emplear las tablas proporcionadas en el Catálogo de Claves, apartado VI.4 de este Instructivo General y seguir las siguientes indicaciones:

- 1) Se presentará una Solicitud de Licencia por establecimiento, en original impresa y una copia en electrónico.
- 2) A su conveniencia, el interesado podrá solicitar en el CIS el disquete del Formato LAU.

- 3) La carátula de la Solicitud LAU y los Datos de Registro que aparecen al inicio del formato, debidamente requisitados, deberán acompañarse, según el caso, con la información que se solicita en las Secciones I a la IV de dicho formato. El documento deberá elaborarse siguiendo el contenido y la forma en que se presentan tales secciones, esto es, respetando títulos y subtítulos, números, formato de los cuadros, etc. Cada sección deberá ir identificada con un separador en el que aparezca su nombre.
- 4) Cuando por razones de índole técnica no sea posible obtener la información que se solicita deberá indicarse ND (No Disponible). Si la información no aplica se indicará NA (No Aplica). En ningún caso deberá dejarse ningún espacio de respuesta en blanco. Debe tenerse en cuenta que si del análisis de la información proporcionada se establece la necesidad de aclarar alguno de dichos aspectos, la SEMARNAT procederá a solicitar dicha aclaración, quedando en suspenso el trámite.
- 5) Cuando en el Formato LAU se solicite la presentación de anexos o sea necesario para la empresa incluir-los, deberán identificarse mediante separadores, anotando en ellos la sección y punto al que éste corresponde, así como su nombre.

ANEXO 4. Empresas que ofrecen el servicio de Incineración en México (SEMARNAT, 2014).

EMPRESA	ESTADO	TIPO DE RESIDUO	CAPACIDAD (ton/año)
Sistemas Integrales en el Manejo de Residuos Industriales, S. de R.L.	Hidalgo	Incineración de residuos peligrosos enlistados en la NOM-052-SEMARNAT-2005, excepto: residuos peligrosos radioactivos, explosivos, orgánicos clorados, persistentes y bioacumulables, así como bifenilos policlorados en concentraciones máximas de 47,500 ppm	12,775
Ciba-Geigy Mexicana, S.A. de C.V. (Planta Atotonilquillo)	Jalisco	Residuos provenientes de la empresa, así como de empresas farmacéuticas	172.936
SI Equipo y Servicios, S.A. de C.V.	Estado de México	Sangre, cultivos y cepas de agentes biológico infecciosos; patológicos; residuos no anatómicos; residuos punzocortantes; plaguicidas; medicamentos fuera de especificación o caducos o que contengan constituyentes tóxicos; envases vacíos contaminados con remanentes de materiales o residuos peligrosos; textiles impregnados con aceites, grasas y/o solventes como aprovechamiento energético; solventes sucios como aprovechamiento energético; natas de pintura; polvos de pintura; residuos de síntesis orgánica; lodos y sólidos de tratamiento térmico; lodos de apresto y trabajo de metales; lodos de tratamiento químico; carbonato- calcio mineral; lodos de neutralización de efluentes ácidos; soluciones salinas; residuos de decantación, filtración y centrifugación; resinas de intercambio de iones saturados; efluentes y lodos de regeneración de resinas; residuos de laboratorio y lodos orgánicos sedimentados en tanques de almacenamiento (hidrocarburos pesados).	8760

EMPRESA	ESTADO	TIPO DE RESIDUO	CAPACIDAD (ton/año)
Waste Services, S.A. de C.V.	Estado de México	Residuos peligrosos biológico infecciosos, residuos peligrosos industriales listados en la NOM-052- SEMARNAT-2005, excepto aquellos que sean o contengan compuestos orgánicos persistentes y bioacumulables; plaguicidas organoclorados; así como baterías y acumuladores usados que contengan metales tóxicos, aquellos que sean o contengan bifenilos policlorados ni explosivos, así como aquellos que sean factibles de reciclar o que contengan altos contenidos de metales o materiales con contenido de asbesto.	8,760
Cleanmex, S.A. de C.V.	Tamaulipas	Incineración de residuos peligrosos definidos en la Norma Oficial NOM-052- SEMARNAT-2005, exceptuando a los residuos que contengan o estén contaminados con cloro, bifenilos policlorados y plaguicidas en cualquier concentración.	9,925
Neutechnik, S.A. de C.V.	Tamaulipas	Residuos peligrosos biológico infecciosos, residuos peligrosos industriales listados en la NOM-052- SEMARNAT-2005, incluyendo compuestos organoclorados y organofosforados tales como bifenilos policlorados, plaguicidas y agroquímicos caducos, excepto residuos peligrosos explosivos, baterías y acumuladores usados que contengan metales tóxicos, así como aquellos que sean factibles de reciclar.	1,680

ANEXO 5. Comparación de tecnologías típicas de incineración

Tecnología	Tipo de Residuos procesado	Tipo de Residuos prohibido	Temperatura de Salida de Gases	Temperatura de Operación
De Lecho Fluidizado	Homogéneos, ya sea sólidos (triturados menores a 2" diam), líquidos (principalmente), lodos, pastosos, sólidos o gaseosos	Residuos susceptibles de fundición y escorias que dificulten la fluidización, compuestos aromáticos y halogenados, residuos biológico-infecciosos	760 - 1100 °C	750 a 940 °C
De Pisos o de Solera Múltiple	Principalmente para lodos de humedades de 95% aproximadamente y aguas residuales, pero también sólidos o gases	Residuos peligrosos, líquidos y lodos orgánicos, compuestos aromáticos y halogenados	260 - 540 °C	760 a 990 °C
Horno Rotatorio	Residuos Peligrosos Lodos Sustancias Líquidas (solventes) Gases	No Aplica	1100-1400°C	800 a 1650 °C
Horno de Parrilla Móvil	Residuos Sólidos Urbanos Residuos médicos. Líquidos	Gases	1000°C	500 a 1000 °C
Hornos de hogar fijo	Residuos peligrosos Sólidos y Gaseosos. Patológicos y Biomédicos	Líquidos	1000°C	600 a 1000 °C

Tecnología	Medio de Alimentación	Subcategorías
De Lecho Fluidizado	Sistema neumático, mecánico o por gravedad con Lecho inerte granulado 0.1 y 1 mm a 800-900°C (cuarzo) y 700-800 °C (piedra caliza)	1) Burbujeante (velocidad 0.15 a 3 m/s) 2) Circulante (velocidad 4.5 y 6 m/s) 3) Atmosférico (presión atmosférica) 4) A Presión (presión superior a la atmosférica)
De Pisos o de Solera	Puertos Laterales (grasas y solidos) Boquillas auxiliares (líquidos y gases) entre 6 y 12 pisos	N/A
Horno Rotatorio	Sistema hidráulico	1) Ashing 2) Slagging
Horno de Parrilla Móvil	Sistema hidráulico	No Aplica
Hornos de hogar fijo	Pistón hidráulico	No Aplica

Tecnología	Ventajas Tecnológicas
De Lecho Fluidizado	1) Temperatura bastante uniforme (Isotérmico) 2) Tiempos de Residencia muy cortos (5s gases y solidos) 3) Turbulencia muy efectiva en la transferencia de calor 4) Gran versatilidad (tipo residuos) y aplicabilidad a gran escala 5) Puede operar en ausencia de Oxígeno
De Pisos o de Solera	1) Admite contenidos de humedad muy altos, incluso mezcla de residuos sólidos y líquidos 2) Gran flexibilidad respecto al tipo de residuos que se alimentan 3) Tiempos residencia largos
Horno Rotatorio	1) Temperaturas adecuadas para residuos peligrosos 2) Tiempos de Residencia muy cortos con turbulencia efectiva entre residuos y aire con Gran versatilidad con aplicabilidad a gran escala y Gran resistencia a altas temperaturas 6) Puede operar en modo intermitente y posee flexibilidad para trabajar en modo continuo.
Horno de Parrilla Móvil	1) Instalaciones de gran tamaño con Inversiones Bajas 3) Todo tipo de carga sin tratamiento previo con Operación continúa 5) Residuos de baja capacidad calorífica
Hornos de hogar fijo	1) Minimiza el arrastre de partículas, por lo que no es necesario utilizar ciclón. 2) Bajos niveles de emisión de partículas 3) Operación semicontinua

Tecnología	Desventajas	Emisiones (mg/Nm ³)/ DRE	Costos Operación
De Lecho Fluidizado	1) Alto consumo energético, debido a la caída de presión en la cama fluidizada 2) Pre-Secado necesario (H<60%) 3) Dificultad en la remoción de residuos del lecho 4) Grandes emisiones ceniza	Bajo contenido de Nox/ 99.996	\$25 - 75 /DT (Iodos) \$0.0025 - 0.021/L (Líquidos)
De Pisos o de Solera	1) Transferencia de Calor muy limitada 2) Control específico de la humedad (carga térmica) y 3) Capacidad limitada	N/D	150 \$ US/Dried Tonne
Horno Rotatorio	1) Productos de reacción: *Parcial *Incompleta *Secundaria	CO 8ppm TUHC 0.5 ppm DRE 99.999 % Partículas 177 mg/m ³ Control de HCl 99.9 %	Equipo \$90 000-\$340 000 USD
Horno de Parrilla Móvil	1) Frecuente mantenimiento de las parrillas 2) Velocidades de aire muy altas lo que trae consigo mucho arrastre de partículas	N/D	N/D
Hornos de hogar fijo	1) Instalaciones de pequeña a mediana capacidad 50-1000 lb/hr capacidad	CO 6.9ppm TUHC 1 ppm DRE 99.994 %	N/D

		Partículas 400 mg/m ³ Control de HCl 98.3 %	
--	--	---	--

Tecnología	Tiempo Operación (day/year)	Costos Instalación	Combustible Admitido
De Lecho Fluidizado	330		Gas Natural, Aceites combustibles y Carbón
De Pisos o de Solera Múltiple	3 - 24 /ton (metric)	55 - 495 \$/kg/hr	Aceites combustibles y gas natural
Horno Rotatorio	N/D	2750-5500 \$/ton diaria	Aire (O ₂)
Horno de Parrilla Móvil	N/D	N/D	Combustibles fósiles y Aire
Hornos de hogar fijo	N/D	N/D	Gas Natural