



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

“INCINERACIÓN DE RESIDUOS BIOLÓGICO
INFECCIOSOS,
SU EFECTO SOBRE LA SALUD Y EL AMBIENTE”

Trabajo de Investigación

P R E S E N T A :

I.A. MENDOZA TOVAR YUNUEN

COMITÉ TUTORAL:

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ
M. EN I. JOSEFINA PAZ BECERRIL ALBARRÁN
DRA. MA. NEFTALÍ ROJAS VALENCIA



JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Aguilar Márquez Armando
Secretario: M. en I. Becerril Albarrán Josefina P.
Vocal: Dra. Fernández Villagómez Georgina
1^{er}. Suplente: Dra. Rojas Valencia María Neftalí
2^{do}. Suplente: Dr. Sosa Echeverría Rodolfo

Lugar donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería, División de Ingenierías Civil y Geomática, Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

TUTOR DE TESIS:

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ

FIRMA

RESUMEN

El presente estudio es una evaluación de la situación actual de la incineración de los residuos peligrosos biológico-infecciosos (RPBI) tratados en México. Este tipo de tratamiento ha sido utilizado en el país con mayor fuerza los últimos años, por lo que es importante investigar cuales son los efectos de éste, así como las ventajas y desventajas del mismo.

La incineración es el tratamiento utilizado para los residuos peligrosos biológico infecciosos – patológicos en México. No obstante si la incineración no es empleada adecuadamente puede comprometer a la salud de la población y el ambiente.

El estudio se dividió en dos partes principales: la investigación teórica sobre la infraestructura existente en México sobre la incineración así como el proceso y el diseño de un equipo incinerador. Se pudo investigar que en el país existen 42 empresas autorizadas por SEMARNAT que llevan a cabo el tratamiento de manera térmica de los RPBI.

Se investigó el tipo de incinerador más adecuado para tratar este tipo de residuos, destacando el incinerador de aire controlado, a partir de este dato se procedió a diseñar el equipo incinerador. El equipo fue diseñado con doble cámara de combustión, el dimensionamiento de la primera cámara es de 4 m de ancho * 2 m de largo y 1.0 m de profundo, con un volumen de 8.39 m³. El volumen de la cámara secundaria es de 8.70 m³, 3 m de ancho * 1.5 m de largo * 0.96 m de profundidad, con tiempos de residencia de 1 y 2 segundos respectivamente.

Se obtuvieron las emisiones teóricas a partir de factores de emisión, se calcularon todas las emisiones de los contaminantes normados en México. Una vez obtenidas las emisiones teóricas se compararon con las emisiones reales destacando que las teóricas son menores que las reales, no obstante los valores teóricos no son tan reales ya que las emisiones fueron determinadas a partir de factores y son cálculos ideales. Sin embargo son confiables por lo cual sirve para hacer el comparativo.

La incineración de residuos biológico - infecciosos es una buena opción de tratamiento siempre y cuando se lleve a cabo de manera adecuada y llevando un control durante el proceso de tratamiento, para evitar la formación de dioxinas y furanos; o bien lograr una baja emisión de contaminantes atmosféricos.

AGRADECIMIENTOS

A mi directora de tesis Dra. Georgina Fernández Villagómez por apoyarme en todo momento y a cualquier hora, por compartir sus conocimientos conmigo y por sus consejos que me impulsan a ser mejor cada día.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo económico para la realización de esta tesis.

Al Ing. Dionisio Deseano Cobos director de Tecnología Ambiental y Servicios Integrales, S.A. de C.V. (TAYSAA) por proporcionarme la información requerida para la presente tesis y su valiosa asesoría.

A la Ing. Pilar porque sin ella no habría podido culminar esta presente tesis.

Al Dr. Daniel Hernández ya que estoy aquí gracias a él y por contar con su orientación y apoyo.

DEDICATORIAS

A mis papas y a mi hermana por estar conmigo en todos los momentos importantes de mi vida y por apoyarme en todas mis decisiones por muy locas que sean, por ser mi ejemplo a seguir, esto es por ustedes.

Al angelito que siempre me cuida "SABINO"

A las nuevas amistades (Juan Fernando, Diana, Sergio, Benja, Rafa, Yenny, Gil) que han surgido a lo largo de esta maestría, con ustedes se ha hecho más ligera y divertida esta maestría.

A Juan Luis que me has asesorado y has estado conmigo en tantos años, aunque no seamos los mismos de antes, jaja. Un año más y habrá otra carta.

A Rafael, por estar conmigo en todo momento sin importar mi estado de ánimo y por apoyarme en todas mis decisiones aunque no estuvieras de acuerdo.

Yunuen Mendoza Tovar

LISTA DE ACRÓNIMOS

| | |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| BPCs | Bifenil Policlorados |
| CE | Convenio de Estocolmo |
| CEPIS | Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente |
| COPs | Compuestos Orgánicos Persistentes |
| COVs | Compuestos Orgánicos Volátiles |
| DGMRAR | Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas. |
| DGMIC | Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes |
| DOF | Diario Oficial de la Federación |
| ECMWF | European Centre for Medium-Range Weather Forecasts |
| HYSPLIT | Hybrid Single Particle Lagrangian |
| INE | Instituto Nacional de Ecología |
| IRPBI | Incineración de Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos |
| LGEEPA | Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente |
| LGPGIR | Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos |
| LMP | Límites Máximos Permisibles |
| MM1 | Plomo + Cromo tota I+ Zinc + Cobre |
| MM2 | Arsénico + Cobalto + Selenio + Níquel + Manganeso + Estaño + Magnesio + Estaño |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos |
| NO _x | Óxidos de Nitrógeno |
| PCIs | Productos de Combustión Incompleta |
| PHAX | Poliaromáticos halogenados |
| PP | Protocolo de Pruebas |
| PVC | Polivinil Clorado |
| RP | Residuo Peligroso |
| RPBI | Residuo Peligroso Biológico Infeccioso |
| SEMARNAT | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales |
| SSA | Secretaría de Salud y Asistencia |
| REPAMAR | Red Panamericana de Manejo Ambiental de Residuos |
| USEPA | Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-1 Ruta de un microorganismo | 10 |
| Figura 2-2 Tratamientos para los RPBI | 11 |
| Figura 2-3 Principales componentes de un sistema de incineración de residuos peligrosos | 17 |
| Figura 2-4 Esquema de Caracterización de un residuo incinerable | 19 |
| Figura 2-5 Esquema de incineración | 20 |
| Figura 2-6 Esquema de un incinerador de aire controlado | 22 |
| Figura 2-7 Módulo de un incinerador que opera con exceso de aire | 23 |
| Figura 2-8 Esquema de un incinerador de horno rotatorio | 25 |
| Figura 2-9 Sistema de inyección seco - seco | 33 |
| Figura 2-10 Sistema de inyección húmedo – seco | 33 |
| Figura 4-1 Estructura general de PCDD y PCDF | 46 |
| Figura 4-2 Efecto producido por las dioxinas y furanos (cloroacné) | 47 |
| Figura 6-1 Estructura de un modelo de dispersión | 62 |
| Figura 7-1 Localización de la empresa Techno Ambiental S.A. de C.V. | 82 |
| Figura 7-2 Colindancias de la empresa Techno | 83 |
| Figura 7-3 Localización de la planta incineradora | 84 |
| Figura 7-4 Empresa incineradora | 84 |
| Figura 7-7 Diagrama de Flujo del proceso de tratamiento de RPBI | 86 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1-1 Identificación y envasado de RPBI según la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002 | 5 |
| Tabla 2-1 Principales ventajas y desventajas de los diferentes métodos de tratamiento de los RPBI | 12 |
| Tabla 2-2 Definición de incineración | 16 |
| Tabla 2-3 Patrón de la reacción de la incineración completa | 18 |
| Tabla 2-4 Principales contaminantes procedentes de la incineración de residuos | 28 |
| Tabla 3-1 Directivas y Reglamentos de la Comunidad Europea relacionada con la regulación de dioxinas y furanos | 37 |
| Tabla 3-2 Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos | 40 |
| Tabla 4-1 Criterios aplicados para valorar el desempeño de las plantas tratadoras | 41 |
| Tabla 4-2 Efectos producidos por dioxinas y furanos | 48 |
| Tabla 4-3 Efectos de las partículas en la salud | 50 |
| Tabla 4-4 Dosis diarias admisibles | 52 |
| Tabla 5-1 Factores de Emisión de Óxidos de Nitrógeno (NO _x), Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Azufre (SO ₂) para incineradores de residuos biológico infecciosos que operan con aire controlado | 60 |
| Tabla 7-1 Caracterización de los residuos cargados al incinerador | 69 |
| Tabla 7-2 Especificaciones teóricas del equipo | 74 |
| Tabla 7-3 Emisiones estimadas a partir de factores de emisión | 75 |
| Tabla 7-4 Estimación de emisiones basadas en factores de emisión | 76 |
| Tabla 7-5 Datos de la fuente | 80 |
| Tabla 7-6 Datos de salida del modelo | 80 |
| Tabla 7-7 Emisiones al 85% de capacidad del sistema de tratamiento | 88 |
| Tabla 7-8 Emisiones al 100% de capacidad del sistema de tratamiento | 89 |
| Tabla 7-9 Emisiones teóricas, físicas y límites máximos permisibles | 90 |

INTRODUCCIÓN

Los Residuos Peligrosos Biológico-Infeciosos (RPBI) son aquellos que contienen agentes patógenos (bacterias, virus, parásitos u hongos) en suficiente concentración para causar enfermedades en hospederos susceptibles. Estos residuos son generados por establecimientos dedicados al cuidado de la salud (de humanos o animales), como: hospitales, consultorios, veterinarios, funerarias y mortuorios, investigaciones médicas, establecimientos de enseñanza, pruebas de laboratorio o laboratorios de investigación, bancos de sangre, clínicas dentales, entre otros.

De todos los residuos generados en los establecimientos para el cuidado de la salud, los RPBI representan del 3 a 8% y aunque solo constituyen una pequeña cantidad de los residuos totales generados por una comunidad, significan un riesgo adicional para el personal directamente expuesto, la salud pública y el medio ambiente debido a su potencial para generar enfermedades si no son manejados adecuadamente. La generación de estos residuos se ha incrementado en los últimos diez años, como consecuencia del aumento en el número y tamaño de los centros de salud, servicios médicos y productos médicos desechables. Por lo que es necesario que ejerzan su responsabilidad legal en la eliminación de estos residuos de manera adecuada (Mendoza y Yebra, 2007).

El manejo de los RPBI representa un serio problema. Para controlarlo y darle solución, es necesario identificar el nivel de riesgo que representan estos residuos y establecer los mecanismos para su manejo integral, con el fin de desarrollar estrategias y medidas de protección más eficientes. La falta de conocimiento por parte de los generadores, conlleva a una subestimación del riesgo para la salud. Esta situación originó la promulgación de la Norma Oficial Mexicana (NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002) que establece la clasificación y especificaciones de manejo de los residuos Biológico-Infecioso. Sin embargo, la generación, manejo y disposición final de los residuos peligrosos aún representa un problema ambiental, por lo que es necesario disponer de ellos adecuadamente (Mendoza y Yebra, 2007).

Dicha norma clasifica a los RPBI en cinco categorías y describe el color y tipo del envase que debe utilizarse de acuerdo a su tipo. Ver Tabla 1-1. En esta norma se incorpora un replanteamiento sobre los criterios de clasificación de los RPBI. Por lo que los residuos que en la pasada norma (NOM-087-ECOL-1995) fueron considerados como RPBI, ahora no se consideran como peligrosos y se disponen en sitios autorizados por el municipio de conformidad con la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, lo que se verá reflejado en una disminución de los costos por su disposición final (Castañeda *et al.*, 2006).

Los RPBI serán tratados por métodos físicos o químicos que garanticen la eliminación de microorganismos patógenos y deben hacerse irreconocibles para su disposición final en los sitios autorizados.

Tabla 1-1 Identificación y envasado de RPBI según la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002

| Tipo de residuos | Estado físico | Envasado | Color |
|-----------------------------------------|---------------|-----------------------------------|----------|
| Sangre | Líquidos | Recipientes herméticos | Rojo |
| Cultivos y cepas de agentes infecciosos | Sólidos | Bolsas de polietileno | Rojo |
| Patológicos | Sólidos | Bolsas de polietileno | Amarillo |
| | Líquidos | Recipiente herméticos | Amarillo |
| Residuos no anatómicos | Sólidos | Bolsas de Polietileno | Rojo |
| | Líquidos | Recipiente herméticos | Rojo |
| Objetos punzocortantes | Sólidos | Recipientes rígidos polipropileno | Rojo |

Fuente: DOF1, 2003, citado por Mendoza y Yebra, 2007

Los métodos de tratamiento que apliquen tanto a establecimientos generadores como a prestadores de servicio dentro o fuera de la instalación del generador, requieren autorización previa de SEMARNAT, sin perjuicio de lo establecido por la Secretaría de Salud de conformidad a las disposiciones aplicables a la materia.

La mayoría de los RPBI pueden ser tratados *in situ*, esto quiere decir que pueden ser sometidos a algún tratamiento dentro de las mismas instalaciones del generador, siempre y cuando éste posea un sistema de tratamiento que cumpla con las especificaciones técnicas establecidas (Castañeda *et al.*, 2006). Algunos de estos tratamientos son mencionados a detalle en el Capítulo II.

No obstante como se menciona anteriormente sólo son la mayoría de los RPBI los que pueden ser tratados *in situ*, más no son todos, quedando excluidos los residuos patológicos. Estos residuos en México deben ser necesariamente tratados por medio de la incineración, que en su mayoría son tratamientos realizados *ex situ* y por empresas prestadoras de servicio.

El proceso de incineración ha existido en México desde finales de la década de los 70, antes del establecimiento de la legislación que rige actualmente a los residuos peligrosos. Los primeros incineradores fueron instalados en hospitales, universidades e institutos de investigación, con el fin de incinerar residuos patológicos o cadáveres; a éstos se sumaron los incineradores particulares de

empresas de la industria química, para la incineración de los residuos generados en sus propios procesos (DGMRAR, 1998).

La incineración se ofreció como un servicio comercial desde 1990, sin embargo, a partir de 1996, tras la publicación de la NOM-087-ECOL-1995, donde se establecen los requisitos de manejo de los residuos biológico-infecciosos, la infraestructura instalada creció rápidamente, en especial para la incineración de estos residuos (DGMIC, 2001).

En la década de los 90 el porcentaje de residuos tratados mediante incineración eran costosos debidos a la mala segregación de los RPBI dentro de las unidades generadoras, las probabilidades de generación de sustancias nocivas como dioxinas, furanos y algunos metales pesados presentes en las cenizas eran frecuentes.

La incineración de RPBI es una práctica común en México y en varios países en vías de desarrollo. El mayor problema de ésta práctica consiste en que la mayoría de las empresas que llevan a cabo este servicio no controlan al 100% los factores de combustión (temperatura, tiempo de retención y turbulencia), a consecuencia de esto no pueden alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales establecidos en la NOM-098-SEMARNAT-2002. Dando como resultado la formación de dioxinas y furanos.

A partir del 2000 las empresas prestadoras de servicio utilizan la incineración para la destrucción térmica de los RPBI tipo patológico que representa el 2 al 5% de los RPBI, el resto es tratado por esterilización húmeda en su mayoría. Como resultado de una buena segregación de los RPBI dentro de las instalaciones generadoras y de la modificación de la NOM- 087- SEMARNAT- SSA1-2002, se ha reducido el porcentaje de RPBI tratado térmicamente y ha llevado a una minimización la generación de dioxinas y furanos.

JUSTIFICACIÓN

El manejo ambientalmente seguro de los residuos peligrosos biológico-infecciosos (RPBI) en la legislación mexicana de residuos peligrosos, depende en gran medida de que se entienda cuáles son los riesgos que se buscan prevenir o controlar, lo cual implica conocer las bases de transmisión de enfermedades por los organismos infecciosos o patógenos, así como, su comportamiento en el ambiente. Esto es necesario, además, para entender el papel que las autoridades sanitarias y ambientales juegan en la formulación e instrumentación de la normatividad en la materia (Cortinas, 2008).

En los hospitales del país diariamente se generan 191 toneladas de residuos biológico infecciosos, lo que significa que cada una de las aproximadamente 127 mil camas censables producen al día 1.5 kilogramos, según datos de la Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (Ríos, 2005).

Antes de la reforma a dicha norma toda la basura generada en los hospitales era considerada peligrosa, pero en la actualidad se separan los residuos peligrosos de los que no representan un riesgo infeccioso. Por lo tanto, al disminuir el volumen de desechos que manejan las compañías bajan los gastos que cubrían los hospitales. Cabe precisar que el resto de los desechos no peligrosos son enviados a los rellenos sanitarios (Ríos, 2005).

Actualmente existen en México 42 empresas autorizadas para la incineración de residuos peligrosos (SEMARNAT, 2009).

La incineración de residuos peligrosos ha originado la atención de ambientalistas y de ciertos sectores de la población en general, en vista del peligro de que se viertan sustancias tóxicas (en especial a la atmósfera por la chimenea) durante el funcionamiento de las unidades. Principalmente, son los productos de combustión incompleta (PCIs).

Entre los contaminantes tóxicos emitidos por los incineradores se encuentran monóxido de carbono, ácido clorhídrico, óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre, partículas, cadmio, plomo, cromo total, cobre, zinc, mercurio, arsénico, cobalto, estaño, dioxinas y furanos (SEMARNAT, 2002).

Es por esto, que la incineración no empleada adecuadamente compromete no sólo la salud de la población actual sino la de las futuras generaciones.

Dado el alto nivel de generación de RPBI en México y considerando la problemática en cuanto a espacio para la disposición final de los residuos. La incineración es un tratamiento viable y seguro si se lleva a cabo bajo las condiciones de operación y mantenimiento adecuadas. No obstante el tratamiento de incineración sólo se recomienda que se lleve a cabo para los residuos

patológicos, mientras que para los otros tipos de residuos existen alternativas de tratamiento. De esta manera se logra una disminución de peso y volumen con la incineración y alargando la vida útil de los rellenos sanitarios.

La incineración es un proceso complejo que debe ser cuidadosamente diseñado y operado, sin embargo, es una tecnología demostrada y disponible comercialmente para el tratamiento de residuos peligrosos biológicos infecciosos.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Evaluar la incineración de residuos peligrosos biológico-infecciosos en México, su efecto sobre la salud y el ambiente, considerando las emisiones a la atmósfera.

1.2 Objetivos Específicos

- Investigar la infraestructura de incineración existente a nivel nacional, así como el equipo mayormente usado.
- Revisar la normatividad nacional e internacional aplicable a la incineración.
- Investigar los sistemas de control de emisión más apropiados para minimizar el impacto de las emisiones al ambiente.
- Diseñar un equipo de incineración de manera teórica, basado en una alimentación conocida, así como el combustible a utilizar.
- Estimar las emisiones a la atmósfera para los contaminantes normados a partir de un caso de estudio.
- Comparar las emisiones de un equipo teórico y un equipo real.
- Detallar los contaminantes más nocivos a la salud y al ambiente considerando su toxicidad.

1.3 Alcances

Se mencionarán los principales contaminantes emitidos a la atmósfera a partir del proceso de incineración de residuos peligrosos biológico-infecciosos empleando la información disponible en los diferentes países de América que cuantifican dichos contaminantes, así como a partir del diseño de un incinerador de manera teórica.

Se puntualizarán los contaminantes criterio y los contaminantes más tóxicos emitidos a la atmósfera a partir del proceso de incineración de residuos peligrosos biológico infecciosos determinados a partir del caso de estudio.

Se mencionaran los efectos hacia la salud y el medio ambiente provocados por las emisiones provenientes de los incineradores de residuos peligrosos biológicos infecciosos.

2 ANTECEDENTES

2.1 Generalidades de los Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos (RPBI)

Para que un residuo peligroso sea considerado biológico infeccioso debe contener agentes patógenos que de acuerdo a la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002 se define como “cualquier microorganismo capaz de producir enfermedades”, siempre y cuando ocurra lo siguiente:

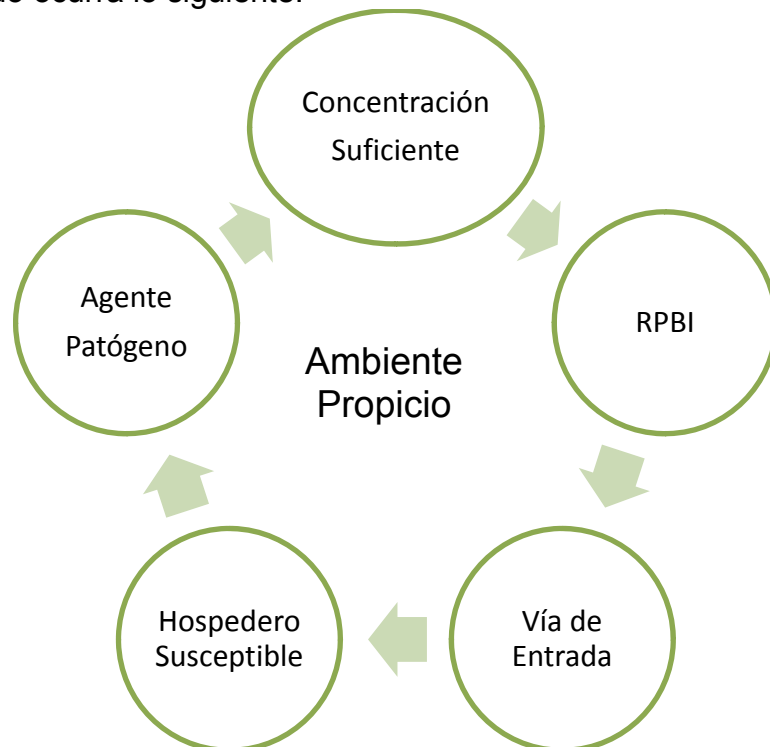


Figura 2-1 Ruta de un microorganismo

Para que un microorganismo sea un agente biológico infeccioso debe de estar en una concentración suficiente (inóculo), en un ambiente propicio (supervivencia), en presencia de una vía de entrada, y en un hospedero susceptible, ver Figura 2-1.

Todas las personas expuestas a RPBI corren riesgo de contaminación a través de una exposición accidental por un mal manejo. Pueden infectarse a través de grietas, cortes en la piel, o absorción a través de las membranas mucosas, y/o lesiones con objetos punzocortantes causando cortes y punciones (agujas de jeringas) (Castañeda *et al.*, 2006).

Los RPBI serán tratados por métodos físicos o químicos que garanticen la eliminación de microorganismos patógenos y deben ser irreconocibles previo a su disposición final en los sitios autorizados.

Los métodos para el tratamiento de los RPBI pueden ser, entre otros, los siguientes:

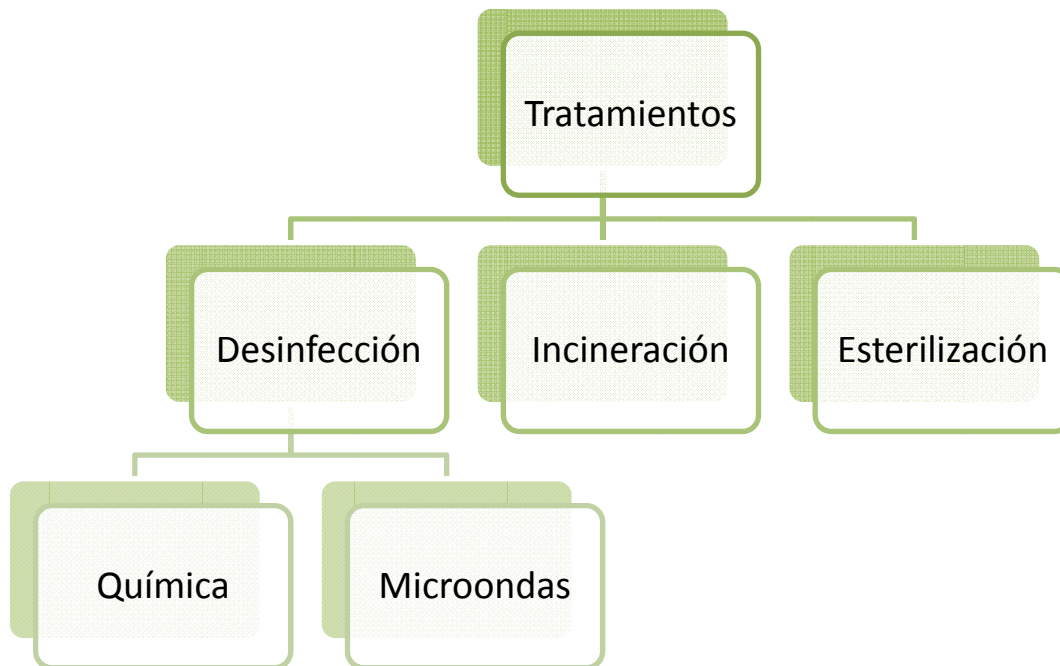


Figura 2-2 Tratamientos para los RPBI

La incineración es el tratamiento para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en el cual todos los factores de combustión como la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos en la NOM-098-SEMARNAT-2002.

La desinfección química consiste en la destrucción de agentes biológico - infecciosos a excepción de las esporas de hongos y bacterias que suelen ser resistentes a este método, mediante la aplicación de sustancias químicas que actúan sobre la vida o desarrollo de los agentes biológico - infecciosos.

La desinfección por microondas, es el tratamiento por el cual se aplica una radiación electromagnética de corta longitud de onda a una frecuencia característica. La energía irradiada a dicha frecuencia afecta exclusivamente a las moléculas de agua que contiene la materia orgánica, provocando cambio en sus niveles de energía manifestados a través de oscilaciones a alta frecuencia, las moléculas de agua al chocar entre sí friccionan y producen un calor elevando la temperatura del agua contenida en la materia, causando la desinfección de los RPBI.

La aplicación de esta tecnología implica una trituración, desmenuzamiento y humedecimiento de los residuos previo al tratamiento, a fin de mejorar la eficiencia

de éste método; donde cada partícula se expone a una serie de generadores de microonda convencionales que producen la desinfección.

La esterilización es el tratamiento que se usa para la destrucción de los agentes biológico – infecciosos, sean cuales sean sus características, siendo lo mismo que sean patógenos o no, que estén sobre el material o dentro de él.

En la siguiente Tabla 2-1 se presentan las principales ventajas y desventajas de los diferentes métodos de tratamiento de los RPBI.

Debido a que la incineración constituye el método de eliminación definitiva más efectivo, la mayoría de las empresas generadores de RPBI utilizan este tratamiento aunado a otro tipo de tratamiento *in situ*, para lograr una disminución en los costos de tratamiento.

No obstante una incineración deficiente puede generar emisiones nocivas a la salud y al medio ambiente.

Tabla 2-1 Principales ventajas y desventajas de los diferentes métodos de tratamiento de los RPBI

| MÉTODO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Incineración | <ul style="list-style-type: none"> • Constituye el método de eliminación definitiva más efectiva ya que puede reducir hasta el 90% del volumen y el 70% del peso y consigue una eliminación adecuada. • Es la principal alternativa para el tratamiento de los residuos patológicos y la única alternativa en México. • Recuperación de energía, sólo cuando el incinerador es de gran tamaño. | <ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de instalación, mantenimiento y de control de emisiones. • Requiere controles especiales para las cenizas y los gases producidos. • Requiere de una autorización por parte de SEMARNAT, para su operación. • Una incineración deficiente puede generar dioxinas y furanos y otros contaminantes en niveles superiores a los límites máximos permisibles. |

Fuente: Castañeda *et al.*, 2006

Continuación de la Tabla 2-1

| MÉTODO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Esterilización | <ul style="list-style-type: none"> • Todo microorganismo puede ser eliminado por este método. • Es un método de esterilización ya que puede eliminar el 100% de los gérmenes, incluyendo las esporas. • El costo es menor al de otros métodos. • Fácil en su operación, únicamente utiliza agua y electricidad. • Al final del tratamiento, los residuos se consideran no peligrosos y pueden ser sometidos a compactación, reduciendo el volumen hasta en un 60%. | <ul style="list-style-type: none"> • Después del tratamiento se requiere llevar a cabo la trituración de los residuos para hacerlos irreconocibles. Este paso eleva los costos del tratamiento. • No es útil para el tratamiento de residuos que contengan productos químicos, ya que pueden generar reacciones violentas. • No debe emplearse para residuos denominados patológicos. • Existe escurrimiento y purga por lo que se presenta contaminación al agua. • Requiere trituración para su disposición final. • No está autorizado por las autoridades competentes. • El peso se incrementa por la humedad lo que implica que pueda saturar los rellenos sanitarios. |

Fuente: Castañeda *et al.*, 2006

Continuación de la Tabla 2-1

| MÉTODO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Microondas | <ul style="list-style-type: none"> Efectivos para la destrucción de todos los gérmenes incluso esporas de bacterias y huevos de parásitos. El tiempo requerido para el tratamiento es menor en comparación con otros sistemas de tratamiento. | <ul style="list-style-type: none"> Los residuos requieren de un nivel específico de humedad para una mayor eficiencia de tratamiento. Los costos de instalación y operación son elevados. Alto consumo de energía. |

Fuente: Castañeda *et al.*, 2006

Como se puede observar en la Tabla 2-1 cada uno de los tratamientos existentes para los RPBI contienen ventajas y desventajas. Cabe destacar que el tratamiento de esterilización no está autorizado, así como no se logra la disminución de los RPBI en cuanto al peso.

Mientras que el tratamiento por microondas genera un alto insumo de energía y en el caso particular de México, su costo es elevado, por lo que se considera que es poco factible económicamente.

No obstante la incineración cumple con la reducción de peso y volumen de los RPBI, así como sus emisiones pueden ser controladas si se cuenta con un buen sistema de control y llevando a cabo un buen proceso de combustión.

2.2 Tratamientos térmicos

El tratamiento térmico de residuos peligrosos se utiliza para lograr la mayoría de los objetivos comunes del tratamiento de residuos: reducción del volumen, eliminación de la materia orgánica móvil, volátil, combustible; y la destrucción de materiales tóxicos y patógenos. El proceso más ampliamente aplicado de tratamiento térmico de residuos peligrosos es la incineración (Manahan, 2007).

2.2.1 Incineración.

La incineración está siendo cada vez más atractiva como un método alternativo de disposición. Las características por las cuales se considera una opción la incineración son las siguientes:

- Los componentes peligrosos de los residuos son destruidos.
- El volumen y el peso de los residuos es reducido a una fracción de su tamaño original.

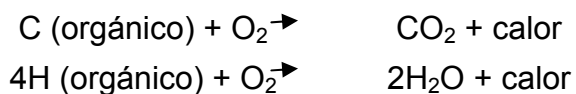
- La reducción de los residuos es inmediata, no se requiere periodos largos de residencia como en los tratamientos biológicos o bien como cualquier otro sistema de disposición.
- El residuo puede ser incinerado (*in-situ*) en el lugar de generación, esto quiere decir que no es necesario transportarlo a un área distinta.
- Las emisiones a la atmosfera pueden ser controladas de manera eficiente de forma que causen un impacto mínimo en el ambiente.
- Las cenizas deben ser caracterizadas para determinar si no son un residuo peligroso. En este caso, la incineración comienza, esencialmente, a ser un método de disposición final así como un método de tratamiento de residuos peligrosos.
- La incineración requiere de espacios pequeños para la disposición final de sus residuos.
- A través de técnicas de recuperación de calor, el costo de operación puede ser reducido o compensar por el uso o venta de energía (LaGrega, *et al*, 2001).

La incineración no es universalmente aplicable para todo tipo de residuos. A continuación se presentan algunas consideraciones:

- Algunos materiales, como los que contienen alto porcentaje de humedad no son combustibles o incinerables.
- El control de los metales en el proceso de incineración se puede dificultar por la presencia de metales pesados en los residuos inorgánicos (cromo, cadmio, mercurio, níquel, arsénico, plomo, etc)
- La incineración represente un alto capital de inversión.
- Se requiere de operadores calificados.
- Requiere combustible suplementario para poner en marcha el incinerador a la temperatura deseada y en el caso de algunos residuos se requiere para mantener las temperaturas de combustión (LaGrega, *et al*, 2001).

2.2.1.1 Definición

La incineración utiliza altas temperaturas, una atmósfera oxidante y condiciones a menudo turbulentas de la combustión para destruir los residuos. Normalmente, el calor requerido para la incineración proviene de la oxidación del carbono enlazado orgánicamente y el hidrógeno contenidos en el material de desecho o en combustible suplementario (Manahan, 2007).



Estas reacciones destruyen la materia orgánica y generan el calor requerido para las reacciones endotérmicas, como la ruptura de enlaces C – Cl en los compuestos organoclorados (Manahan, 2007).

En la Tabla 2-2 se muestra definición de la incineración de acuerdo a diferentes bibliografías.

Tabla 2-2 Definición de incineración

| Definición | Fuente |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Método de tratamiento que consiste en la oxidación de los residuos, vía combustión controlada. Tratamiento: Acción de transformar los residuos, por medio del cual se cambian sus características. | LGEEPA, 2003 |
| La incineración es la oxidación por medio de la quema controlada de materiales, para dar productos simples y mineralizados como dióxido de carbono y agua. | Colin, 2001 |
| La incineración de residuos peligrosos es un proceso que involucra la exposición de los materiales de desecho a condiciones oxidantes a una temperatura alta, normalmente mayor de 900°C. | Manahan, 2007 |
| La incineración es el proceso donde los residuos son quemados bajo condiciones controladas para oxidar el carbón e hidrógeno presentes en ellos, transformando cualquier material con contenido de carbón, incluyendo los patógenos. Entre sus ventajas, están la reducción de volumen (hasta de un 90%), no hay que acondicionar los residuos antes del tratamiento. Su gran desventaja es la emisión de contaminantes a la atmósfera, grandes riesgos durante la operación, personal altamente capacitado. Requiere de altas inversiones iniciales, de operación y mantenimiento. | CE, 2003 |

2.3 Origen

La incineración tiene su origen en Europa, con más de cien años de existencia; su historia empezó con la instalación del primer "destructor" de residuos municipales en la ciudad inglesa de Nottingham en 1874. En Estado Unidos de Norteamérica

la primera instalación se realizó en "Governor's Island" en Nueva York, y en 1921 ya había más de 200 unidades instaladas (Baldasano, 2000).

La incineración de residuos requiere una gran atención al nivel de dominio de las condiciones de combustión. Una buena combustión se rige por la regla llamada de las "3 T": temperatura, tiempo de residencia y turbulencia.

Baldasano (2000), menciona que estos parámetros generalmente se fijan en el momento del diseño del horno, pero el que lo opera conserva el dominio de la temperatura haciendo variar la carga térmica, y el dominio del caudal de aire de combustión. La mala regulación de uno de estos parámetros puede generar condiciones inadecuadas de funcionamiento.

Baldasano (2000) también cita que todos los sistemas de incineración están provistos con tecnologías para tratamiento de las emisiones gaseosas y cenizas.

2.4 Descripción general sobre el proceso de incineración

Los principales componentes en los sistemas de incineración de residuos peligrosos se muestran en la Figura 2-3.

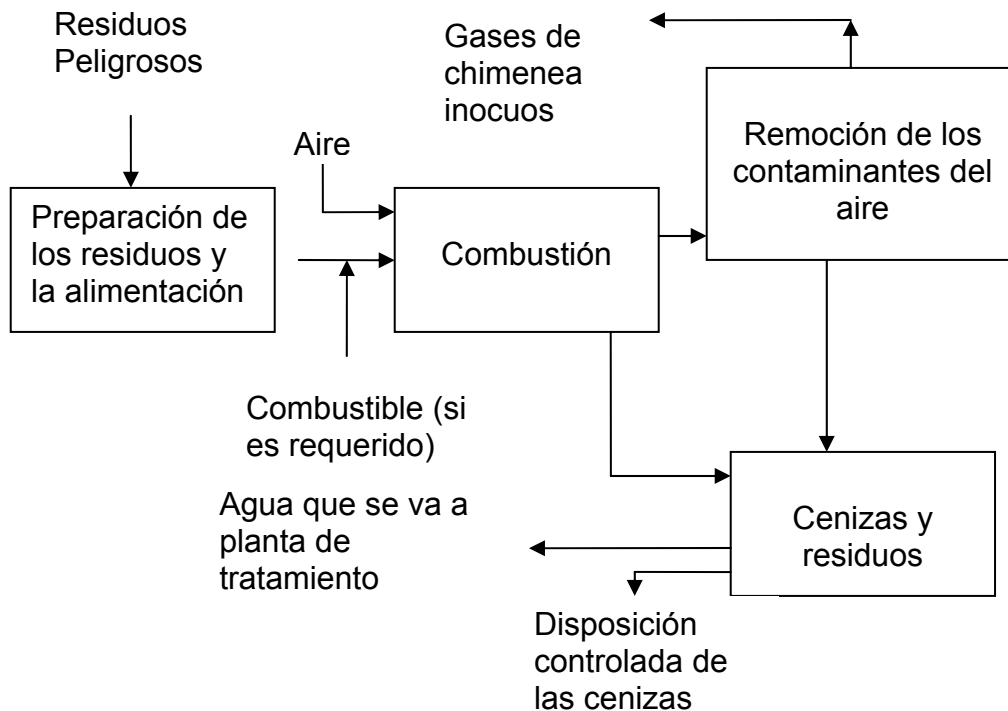


Figura 2-3 Principales componentes de un sistema de incineración de residuos peligrosos (Manahan, 2007)

El objetivo final de la incineración de residuos peligrosos es el convertir los productos de la combustión en materiales menos nocivos para poderlos emitir con

seguridad al ambiente. Se puede observar en la Tabla 2-3 el patrón de la reacción de la incineración llevada a cabo de manera completa.

Tabla 2-3 Patrón de la reacción de la incineración completa

| Elemento del residuo | Conversión | Productos |
|----------------------|------------|---------------------------------|
| Hidrógeno, H | → | H ₂ O |
| Carbono, C | → | CO ₂ |
| Cloro, Cl | → | HCl o Cl ₂ |
| Flúor, F | → | HF o F ₂ |
| Azufre, S | → | SO ₂ |
| Nitrógeno, N | → | N ₂ |
| Metales alcalinos | → | Carbonato |
| Sodio, Na | → | Na ₂ CO ₃ |
| Potasio, K | → | KOH |
| Metales no alcalinos | → | Óxidos |
| Cobre, Cu | → | CuO |
| Hierro, Fe | → | Fe ₂ O |

Fuente: Lee, 1990

A menudo la parte más compleja en los sistemas de incineración de residuos peligrosos es el sistema de control de la contaminación atmosférica, la cual involucra varias operaciones. Las operaciones que son utilizadas en el control de la contaminación atmosférica a partir de un incinerador de residuos peligrosos son el enfriamiento del gas de combustión, recuperación de calor, amortiguamiento, remoción de las partículas de la materia, retiro del gas ácido, tratamiento y manejo de los sólidos del subproducto (Manahan, 1993).

2.5 Tipos de incineradores

2.5.1 Selección de un sistema de incineración

La caracterización de los residuos incinerables constituye la base de partida para abordar la elección de los equipos, su diseño y las condiciones de operación de las diferentes etapas que conforman el proceso. Además de los requerimientos puramente técnicos, en el caso de las incineradoras, hay que tener en cuenta ciertos condicionantes legales que regulan las condiciones de funcionamiento y los límites de emisión de los gases a la atmósfera relativa a la incineración de RP (Lee, 1990).

Para caracterizar el residuo, se somete a un test de incinerabilidad al objeto de determinar las propiedades físicas, químicas y termodinámicas del residuo. El esquema de caracterización de un residuo incinerable se puede observar en la Figura 2-4.

| RESIDUO | | | | |
|------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------|---------|
| Estado y Propiedades Físicas | Análisis Elemental e Inmediato | Poder Calorífico | Análisis de Compuestos de alta peligrosidad y/o toxicidad | Cenizas |

Figura 2-4 Esquema de Caracterización de un residuo incinerable

El estado físico y algunas propiedades físicas (viscosidad, densidad, características reológicas, etc.) del residuo condicionan principalmente el modo de alimentación al horno de combustión, con objeto de lograr el contacto adecuado entre la materia combustible y el oxígeno. En el caso de residuos líquidos y lodos de baja viscosidad se inyecta en la cámara de combustión a través de un inyector o atomizador para adecuar el tamaño de gota. Los sólidos requieren normalmente operaciones previas antes de su alimentación (molienda, tamizado) (Lee, 1990).

Determinación de la humedad, cenizas, volátiles y carbono fijo. El contenido de humedad o cantidad de agua que acompaña al residuo es muy importante por su influencia en el balance calorífico del proceso.

La proporción de volátiles COVs requiere ser conocida ya que uno de los puntos débiles de las incineradoras es la emisión gaseosa de compuestos de combustión incompleta.

Colin (2001). Menciona que el contenido en cenizas determina el volumen o peso final de residuo tras la incineración. Respecto a la materia inorgánica, interesa analizar los metales pesados ya que pueden aparecer en las cenizas fijas, con el consiguiente riesgo de toxicidad de los mismos, o pasar a la fase gaseosa (As, Pb, Cd, Hg, etc.). Interesa asimismo conocer la fusibilidad de las cenizas, que depende no sólo de su constitución sino también del carácter oxidante de la atmósfera en que se lleve a cabo la incineración.

La selección del incinerador más adecuado para la eliminación de un grupo de residuos peligrosos concreto es complicada, habrá que tener en cuenta la legislación aplicable, la capacidad de tratamiento que se necesita en la planta y las propiedades de los residuos peligrosos. Pero el esquema inicial es el mismo en todos los casos, lo que varían son los tratamientos posteriores de los efluentes gaseosos, los líquidos y las cenizas para eliminar los contaminantes de los que se ha hablado (que varían en cada caso). El esquema básico es el siguiente ver Figura 2-5 (Colin, 2001).

La infraestructura existente en México para el tratamiento térmico de RPBI (incineración) es de 42 empresas a lo largo del país, concentrándose en su mayoría en el centro del mismo. Esta infraestructura ha estado variando en los últimos 8 años a razón del surgimiento de la NOM-098-SEMARNAT-SSA1-2002, ya que con esta norma las empresas incineradoras deben de cumplir con los

lineamientos establecidos en la misma, así como los límites máximos permisibles de emisión. Para que una empresa pueda operar en la actualidad debe aprobar un protocolo de pruebas.

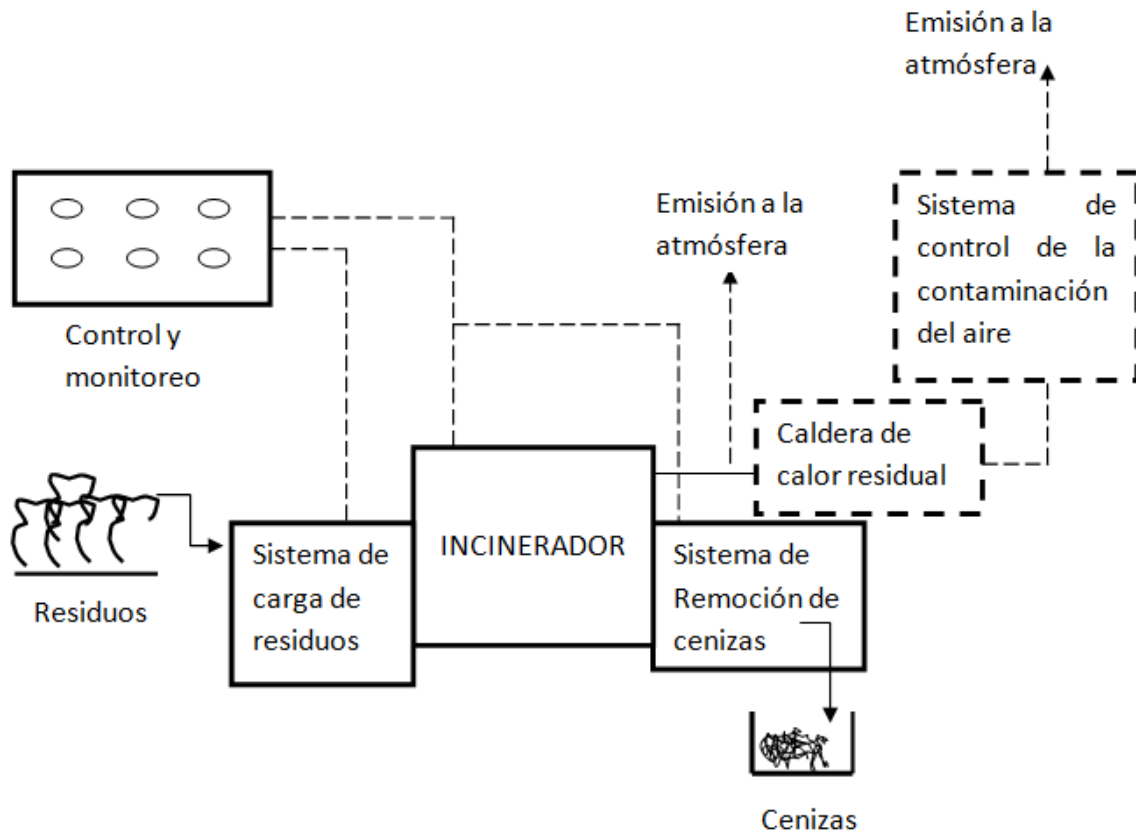


Figura 2-5 Esquema de incineración (Lee, 1990)

2.5.2 Tipos de incineradores para el tratamiento de residuos peligrosos biológico infecciosos.

La mayoría de los incineradores de residuos peligrosos biológicos infecciosos operados en Estados Unidos, se encuentran dentro de tres categorías:

- Exceso de aire
- Aire controlado
- Incineradores rotatorios

Dependiendo del diseño, los incineradores deben ser operados como continuos, intermitentes o bien batch (Lee, 1990). A continuación se detallan cada uno de estos sistemas de incineración.

- Incineradores de aire controlado

La incineración de aire controlado es la tecnología más comúnmente utilizada en la incineración de residuos peligrosos biológicos infecciosos, y es la tecnología

que domina el mercado. Esta tecnología es también conocida como incineración deficiente de aire, es llevada a cabo en dos cámaras o módulos de combustión.

Los incineradores actuales deben poseer dos cámaras de combustión conectadas en serie. En la primera cámara se alojan los residuos, los cuales son sometidos a combustión en deficiencia de oxígeno, y en la segunda cámara se queman los humos y gases volátiles en presencia de un exceso de oxígeno. Este tipo de hornos es el más recomendable debido a que genera pocas emisiones y se logra un mejor control de las mismas.

El término hambriento de aire es derivado del principio de combustión. La combustión de aire en la cámara de combustión primaria, donde se lleva a cabo la alimentación con los residuos, es estrictamente controlada por lo que la cantidad de aire presente en esta es menor que la que se requiere para llevar a cabo una combustión completa.

Este tipo de incineradores es generalmente conocido como incinerador de aire controlado, debido a que la cantidad y la distribución de aire en cada cámara de combustión son controladas para resolver los requerimientos de diseño. Este tipo de incineradores vienen en todos tamaños y formas. Los incineradores están disponibles con capacidades de diseño que van desde 23 hasta 1,800 kg/h. Algunos son controlados manualmente, mientras que otros son controlados de manera automática (Lee, 1990).

La combustión de los residuos en incineradores de aire controlado ocurre en dos etapas. En la primera fase, los residuos se alimentan en la cámara primaria, esta es la cámara de combustión, que funciona con menor cantidad estequiométrica de aire requerida para la combustión. El aire de combustión se incorpora a la cámara primaria debajo del hogar del incinerador (debajo de la cama ardiente de los residuos). Este aire se llama aire primario o debajo del fuego. En la cámara primaria (hambrienta de aire), el bajo cociente del aire-combustible seca y facilita la volatilización de los residuos, y la mayor parte del carbón residual en la quema de la ceniza. En estas condiciones, las temperaturas del gas de combustión son relativamente bajas (760 a 980°C).

En la segunda etapa, el exceso del aire se agrega a los gases volátiles formados en la cámara primaria a la combustión completa. Las temperaturas en la cámara de combustión secundaria son más altas que las temperaturas de la cámara de combustión primaria, típicamente 980 a 1,095°C.

Dependiendo del poder calorífico y de la humedad de los residuos, puede ser necesario que se adicione más calor. Esto se puede proporcionar por las hornillas auxiliares situadas en la entrada al compartimiento (superior) secundario para mantener temperaturas deseadas. En la Figura 2-6 se puede ver el esquema de un incinerador de aire controlado.

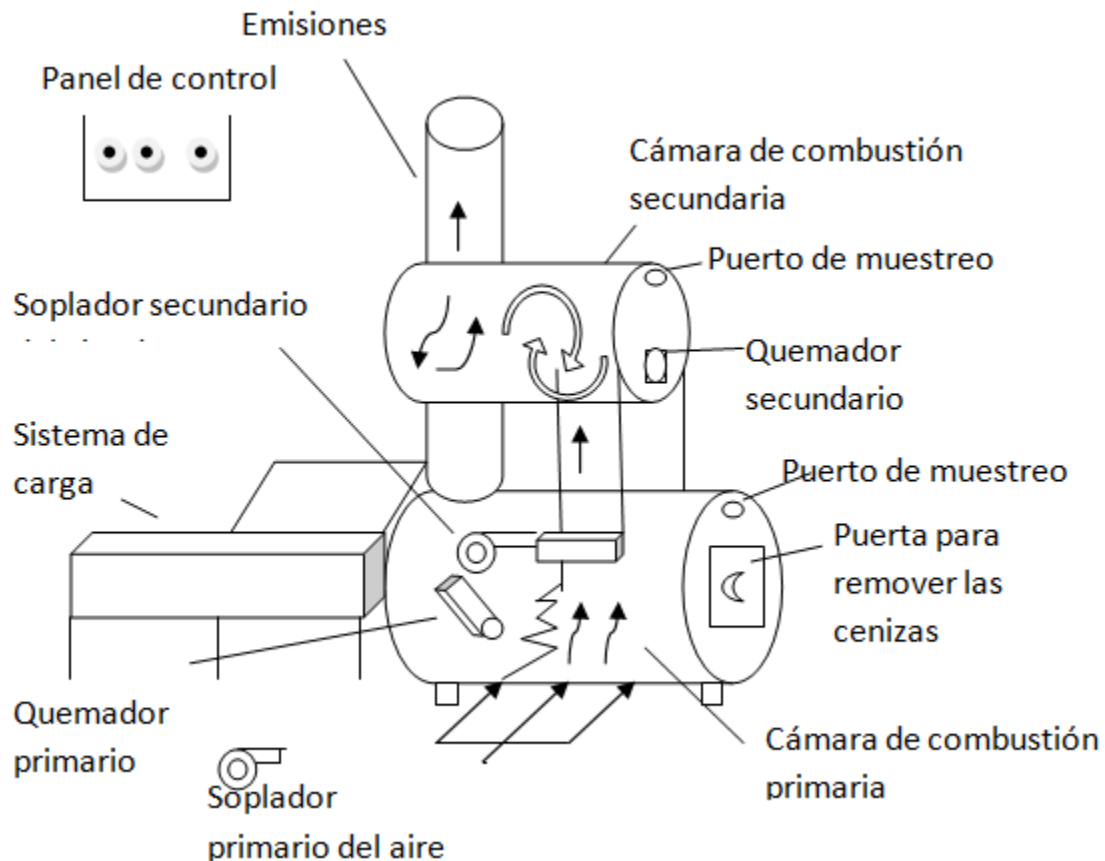


Figura 2-6 Esquema de un incinerador de aire controlado (Lee, 1990)

Las capacidades de rendimiento de procesamiento para los residuos de un valor calorífico más bajo pueden ser más altas, puesto que las capacidades de la alimentación son limitadas por la cámara de combustión primaria. Las cantidades de calor enviadas para los incineradores de aire controlado se extienden típicamente de cerca de 16,021,346.6 a 26,453,851.3 kJ/h-m³.

Debido a la baja adición de flujo de aire en la cámara de combustión primaria, y correspondiendo al bajo flujo de la velocidad del gas (y turbulencia), la cantidad de sólidos arrastrados en los gases que salen del cámara de combustión primaria es baja. Por lo tanto, la mayoría de incineradores de aire controlado no tiene dispositivos adicionales para la depuración de gases.

- Incineradores con exceso de aire

Los incineradores de exceso de aire también son conocidos como incineradores de cámaras múltiples, debido a que están conformados por dos o más cámaras de combustión; la cámara de combustión primaria para la combustión de la fase sólida y la cámara de combustión secundaria para la combustión de la fase gaseosa. Como la alimentación de los residuos es operada siempre en un modo batch, el incinerador de exceso de aire es también comúnmente conocido como

discontinuo. Como el nombre lo dice, el incinerador de exceso de aire es operado con niveles de exceso de aire por arriba de los requerimientos estequiométricos (típicamente 60 a 200% de exceso de aire) en ambas cámaras.

En la Figura 2-7 se presenta un diagrama de un incinerador que opera con un exceso de aire.

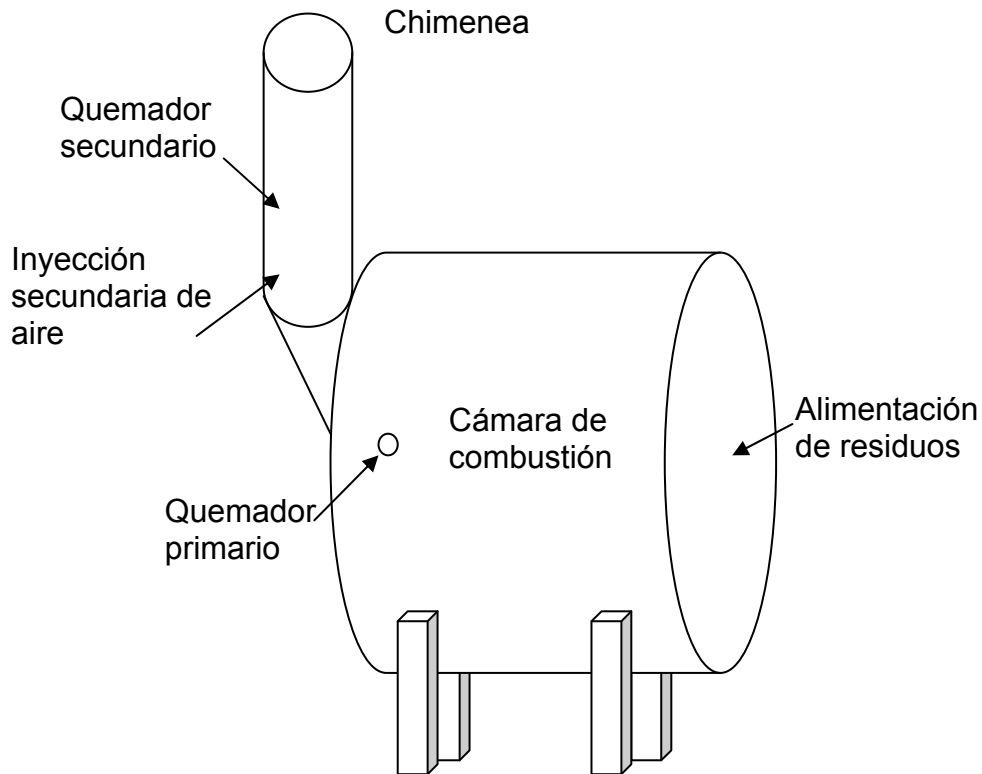


Figura 2-7 Módulo de un incinerador que opera con exceso de aire (Lee, 1990)

Los gases de combustión giran en dirección vertical (arriba y abajo) como si fuera un incinerador en línea, pero también giran a los lados como si fluyeran a través del incinerador. Debido a que la cámara secundaria se encuentra adyacente a la cámara primaria (comparten la pared) y los gases giran en forma de "U", el diseño del incinerador es más compacto. En general este tipo de incineradores tienen una capacidad mayor a 340 kg/h (Lee, 1990).

Un incinerador de este tipo opera en forma sintetizada de la siguiente manera: Generalmente los residuos son colocados manualmente en la cámara de combustión primaria. Una vez que es alcanzada la temperatura requerida (870 a 980 °C), se enciende la hornilla primaria. La hornilla primaria incinera los residuos.

Los productos de combustión y los gases vaporizados pasan del compartimiento primario a la cámara de combustión secundaria, a través del puerto de la flama. El aire de combustión secundaria es agregado en el puerto de la flama. El diseño del

puerto de la flama y la cámara de mezclado, así como la adición del aire secundario, promueven el mezclado.

Una hornilla secundaria localizada en la cámara de mezclado provee el calor adicional que se requiere para mantener las temperaturas de combustión.

La combustión de los gases comenzados en la cámara de mezclado continúa mientras que los gases pasan a través de un puerto que se encuentra en la pared de la cámara secundaria (Lee, 1990).

Una vez que los residuos han empezado a incinerarse, usualmente el quemador se apaga debido a que éste ya no es requerido. Inicialmente, la humedad y los gases volátiles orgánicos son vaporizados. Los gases volátiles son quemados en la cámara de combustión primaria y en la secundaria.

El aire es suministrado a una tasa constante a lo largo del proceso de combustión. Durante este periodo inicial, las cantidades de aire suministradas son las requeridas estequiométricamente. A medida que la materia orgánica es consumida, menos aire es requerido. Eventualmente la cámara opera con exceso de aire.

A medida que la incineración se lleva a cabo, la combustión de la fracción de los gases no volátiles (carbón mezclado) de los residuos ocurre en la cámara de combustión primaria. Generalmente, el dispositivo de poscombustión se apaga después de un tiempo determinado. Una vez que el compartimiento se enfría, la ceniza es retirada.

Los incineradores diseñados para los residuos RPBI en general funcionan en los niveles de exceso de aire de hasta el 300%. Si solamente se queman los residuos patológicos, los niveles de exceso de aire van cerca del 100%. El exceso del aire bajo ayuda a mantener una temperatura más alta en el compartimiento cuando los residuos poseen una humedad elevada.

- Incineradores del horno rotatorio

Un sistema de incineración con horno rotatorio consiste de un horno rotatorio y de una cámara de combustión secundaria, este tipo de incinerador es muy versátil en el sentido que éste es aplicable a la destrucción de los residuos sólidos, no obstante lo utilizan también para la incineración de RPBI. Sin embargo no es muy eficaz ya que la generación de cenizas es mayor que los otros equipos de incineración.

Los incineradores del horno rotatorio, como los otros tipos, se diseñan con una cámara de combustión primaria, donde los residuos son quemados y volatilizados, y una cámara de combustión secundaria, donde la combustión de la fracción volátil se termina.

La cámara de combustión primaria consiste en un horno levemente inclinado, giratorio en el cual los residuos emigren del extremo de la alimentación al extremo de la descarga de la ceniza. La tasa de rendimiento del proceso es controlada ajustando el índice de rotación del horno y el ángulo de la inclinación. El aire de combustión incorporada a la cámara de combustión primario es a través de un puerto. Un quemador auxiliar se utiliza generalmente para comenzar la combustión y para mantener las temperaturas deseadas en la combustión. La cámara de combustión primaria y la secundaria se alinean generalmente con el ladrillo refractario a prueba de ácido. Se puede observar en la Figura 2-8 el esquema general de un incinerador de horno rotatorio.

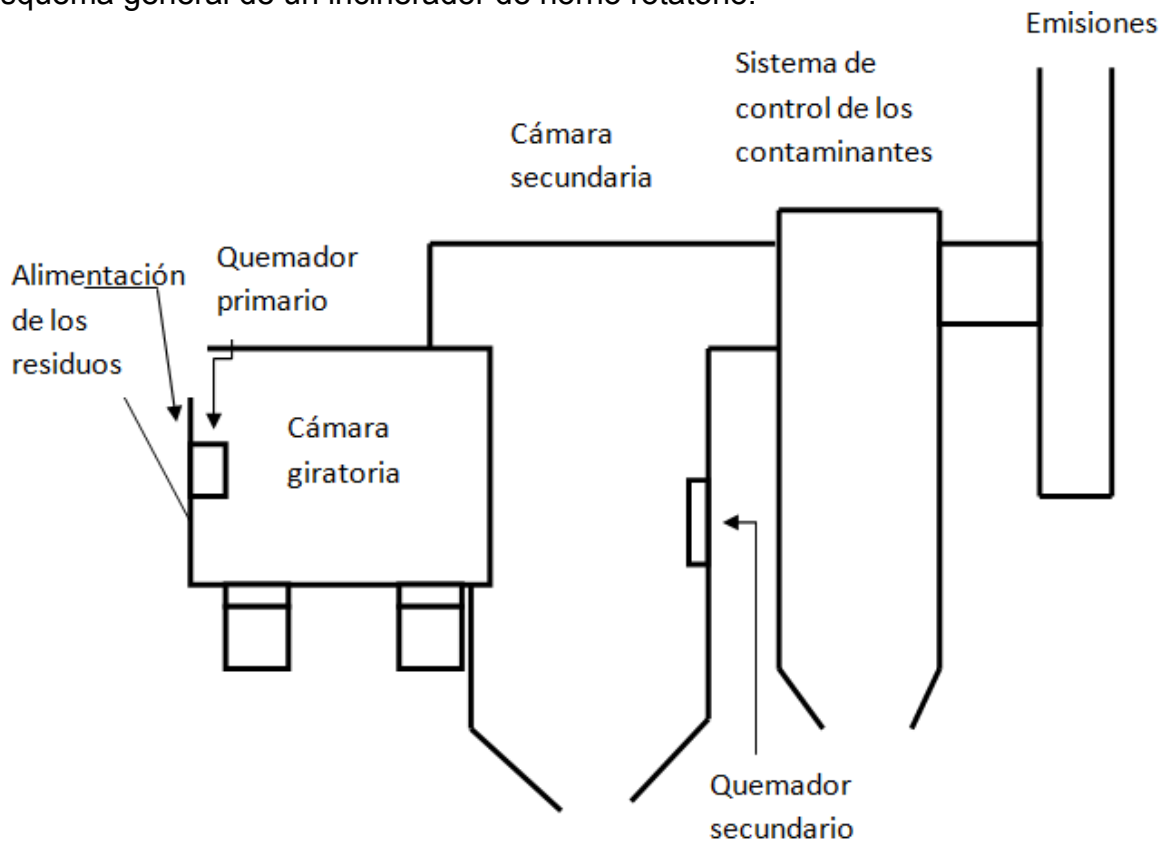


Figura 2-8 Esquema de un incinerador de horno rotatorio (Lee, 1990)

Los gases volátiles y los de combustión pasan por ambos compartimientos. El compartimiento secundario funciona con exceso de aire. La combustión de los volátiles se termina en este compartimiento. Debido al movimiento turbulento de los residuos en el compartimiento primario, el grado de incineración de los residuos sólidos y el arrastre de partículas en el humo es más alto para los incineradores del horno rotatorio que para otros diseños de incineradores. Consecuentemente, los hornos rotatorios tienen generalmente dispositivos adicionales de la depuración de gases (USEPA,1997).

El tipo de incinerador más adecuado para los residuos peligrosos biológicos infecciosos, es el incinerador de aire controlado.

2.6 Condiciones de la combustión

La clave para la incineración eficaz de residuos peligrosos descansa en las condiciones de combustión. Éstas requieren:

- I. Suficiente oxígeno libre en la zona de combustión
- II. para asegurar la combustión de los residuos;
- III. Turbulencia para la mezcla completa de los residuos, oxidante y (en los casos donde el desecho no tiene el contenido de combustible suficiente para ser quemado solo) combustible suplementario;
- IV. Altas temperaturas de combustión, por encima de 900°C, para asegurar que los compuestos térmicamente resistentes reaccionen y
- V. Tiempo de residencia suficiente (por lo menos dos segundos) para permitir que las reacciones ocurran.

El control de estos parámetros es imprescindible para una correcta incineración, y además están relacionados, de modo que se varían uno, se tendrá que variar los otros en su justa medida para no perder la efectividad en la combustión y por ende en la generación de productos de combustión incompleta que formarán parte de las emisiones gaseosa (Colin, 2001).

2.7 Productos de la incineración

En las emisiones provenientes de IRPBI se han identificado los siguientes contaminantes:

- Gases ácidos: HCl, HF, HI, HBr, SO₂, C1₂, Br₂, I₂, etc.
- Metales pesados: Pb, Cd, Hg, Cr, Sb, As, Tl, etc.
- Polvo y ceniza: metales, silicatos, óxidos, etc.
- Productos de combustión incompleta (PCIs): CO, hollín, alquitranes, aromáticos.
- Hidrocarburos halogenados (HCX): clorofenoles, Dioxinas, Furanos, etc (Narváez *et al.*, 2006)

La gran variedad de sustancias contenidas en los humos provenientes del incinerador son el resultado directo de las condiciones de operación del proceso, es decir, su presencia y concentraciones dependen de: las temperaturas, el tiempo de residencia, el exceso de oxígeno y la turbulencia. Otros compuestos dependen de la composición de los desechos y otros, como los PHAX no dependen de las condiciones del incinerador, sino que, se forman en el interior de los ductos o chimeneas. Los PHAX se catalogan en la categoría de sustancias tóxicas y peligrosas, ya que poseen probadas propiedades irritantes, corrosivas, cancerígenas y teratogénicas (Narváez *et al.*, 2006).

Las cenizas de fondo o escorias generadas en la cámara de combustión primaria, se componen principalmente de materiales inertes mientras que las cenizas volantes que se atrapan en los equipos de control de emisiones, presentan mayor concentración de materia orgánica y de metales en forma de compuestos relativamente solubles, algunos de los cuales como el Cd, Ni o Pb, están regulados como constituyentes peligrosos en la NOM-052-ECOL-1993 (Rosas, 2002).

En México y los Estados Unidos de Norteamérica, las cenizas deben disponerse como residuos peligrosos cuando al realizar una prueba de extracción se encuentren compuestos en concentraciones mayores a las permitidas (Rosas, 2002).

Las aguas residuales de las plantas de incineración provienen de los equipos de lavado de gases o de la limpieza de contenedores, vehículos, derrames, entre otros, y en general se depuran por medio de trenes de tratamiento físico-químico. La NOM-098-ECOL-2000 establece que las aguas residuales deberán ajustarse a los criterios particulares de descarga o a los ordenamientos jurídicos aplicables que en este caso serían las Normas NOM-001-ECOL-1996 Y NOM-002-ECOL-1996 (Rosas, 2002).

Las emisiones atmosféricas dependen de la composición de los residuos, las condiciones de la combustión y el diseño y las condiciones de operación de los sistemas de tratamiento de los gases de escape.

En la incineración totalmente oxidativa, las emisiones de gases de escape constan de vapor de agua, nitrógeno (N), dióxido de carbono (CO₂) y oxígeno molecular (O₂). Otros contaminantes incluyen: gases ácidos (HCl, SO₂, NO_x, PM, COVS y metales volátiles).

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

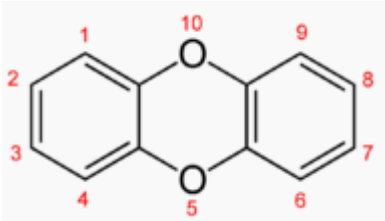
- Las dioxinas y furanos son formadas en cualquier proceso de combustión, siendo más crítico si el proceso de combustión no es controlado.
- El desarrollo de la incineración y por ende la incorporación de tecnología más moderna ha incluido un sistema de enfriamiento rápido de los gases de combustión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

Se observan en la Tabla 2-4 los principales contaminantes procedentes de la incineración de residuos peligrosos biológicos infecciosos.

Tabla 2-4 Principales contaminantes procedentes de la incineración de residuos

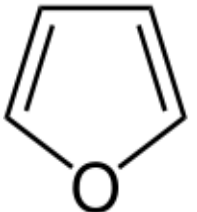
| NOMBRE | FÓRMULA | CARACTERÍSTICAS |
|---------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Óxidos de nitrógeno | NO _x | Los más importantes son NO y NO ₂ . Los óxidos de nitrógeno son precursores de la formación de ozono (O ₃) y nitratos de peroxiacilo (NPA), Y contribuyen a la formación de aerosoles nítricos que causan lluvia ácida y niebla. |
| Dióxido de azufre | SO ₂ | Es un gas irritante para los ojos, nariz y garganta, y en altas concentraciones pueden producir enfermedades o la muerte en personas afectadas de problemas respiratorios. Es el principal responsable de la producción de lluvia ácida. |
| Monóxido de carbono | CO | Se forma cuando la combustión de materiales carbonosos es incompleta. |
| Partículas | | Se forman por combustión incompleta del combustible y por arrastre físico de los materiales no combustibles. |
| Metales | | En concreto, se ha observado la presencia de Cd, Zn, Sb, Ag y Sn en los gases de salida, así como también de Hg en menores concentraciones. |

Continuación de la Tabla 2-4

| NOMBRE | FÓRMULA | CARACTERÍSTICAS |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gases ácidos | | La incineración de residuos contienen flúor y cloro, estos generan gases ácidos como el fluoruro y el cloruro de hidrógeno. |
| Dioxinas | <p>Su molécula está formada por una estructura de triple anillo en la que dos anillos de benceno están unidos por un par de átomos de oxígeno.</p>  <p>Las dioxinas más tóxicas son las 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD).</p> | Una de las causas más probables de la generación de dioxinas en la incineración es la formación a partir de sus precursores orgánicos en las zonas más frías de la post-combustión, por la acción del ácido clorhídrico que se genera durante el proceso. Ello favorece la formación de un agente clorante que, en contacto con los compuestos aromáticos presentes, dan lugar a este tipo de compuesto. El rango de temperaturas en el cual se forman las dioxinas en la superficie de las partículas de ceniza es de 250 a 400°C, con un máximo a 300°C. |

Fuente: Rhyner *et al.*, 1995.

Continuación de la Tabla 2-4

| NOMBRE | FÓRMULA | CARACTERÍSTICAS |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Furanos | <p>Su molécula está formada por una estructura de dos anillos de benceno están unidos por un solo átomo de oxígeno.</p> <p>Fórmula empírica C_4H_4O</p>  | <p>Una de las causas más probables de la generación de furanos en la incineración es la formación a partir de sus precursores orgánicos en las zonas más frías de la post-combustión, por la acción del ácido clorhídrico que se genera durante el proceso. Ello favorece la formación de un agente clorante que, en contacto con los compuestos aromáticos presentes, dan lugar a este tipo de compuesto.</p> |
| PAHs | <p>Los hidrocarburos aromáticos policíclicos son compuestos orgánicos análogos al benceno que contienen anillos aromáticos de seis miembros conectados entre ellos mediante la compartición de un par de C adyacentes, lo cual da lugar a anillos fusionados.</p> | <p>Se forman al quemar parcialmente materiales que contienen carbono, por tanto son productos de una mala combustión.</p> |

Fuente: Rhyner *et al.*, 1995.

Se mencionaran a detalle en el capítulo 4 los principales contaminantes tóxicos (dioxinas, furanos, metales pesados y partículas ultra finas) emitidos por los incineradores de residuos peligrosos biológicos infecciosos.

2.8 Sistemas de control de las emisiones

Los sistemas de control de emisiones asociados con la incineración de residuos peligrosos es única en cuanto a la combinación de los elementos, pero los elementos por si mismos (lavadores, filtros, ciclones, etc.) no lo son (LaGrega *et al.*, 2001).

La mayoría de los sistemas de control de las emisiones de los incineradores de residuos peligrosos, requieren dos elementos funcionales:

1. Un sistema o equipo que contenga un removedor de partículas para el flujo de la corriente del gas y
2. Un sistema o un equipo que remueva los gases ácidos.

Estas dos funciones pueden ser logradas con sistemas húmedos o sistemas secos o bien con la combinación de los mismos (LaGrega *et al.*, 2001).

2.8.1 Remoción de las partículas

La densidad de las partículas en el flujo del gas en los incineradores es medida en gr /dscf o mg/dscm. La densidad de la partícula en el gas varía constantemente, dependiendo de dos factores: la velocidad del gas en el incinerador y en el tamaño actual de la partícula. Mientras más pequeña sea la partícula, es más fácil que sea arrastrada por la corriente del gas hacia arriba con una velocidad baja. Mientras más grande sea la velocidad del gas, las partículas más grandes van a poder ser arrastradas en el flujo de la corriente y una mayor cantidad de partículas de diferentes tamaños también van a ser arrastradas al flujo.

La remoción de partículas provenientes de la corriente del gas puede ser llevada a cabo por la separación por gravedad, de la interferencia (como impactos de las partículas con otros objetos), separación centrífuga, filtración a través de un filtro, separación electrostática, o con lavadores. La remoción de partículas puede ser llevada a cabo de manera eficiente por métodos secos, o bien con la combinación de métodos húmedos y secos o bien por métodos húmedos solamente.

Los métodos de remoción seca de partículas son:

- Impactación - pantallas
- Separación centrífuga - separadores de ciclones
- Filtración - filtros
- Electrostática - precipitadores

Los métodos húmedos que utilizan agua como un medio son:

- Impactación - columnas de relleno
- Separación centrífuga - ciclones húmedos
- Partículas mojadas - venturis y unidades similares
- Partículas acondicionas - lavador de colisión
- Electrostática - precipitadores

2.8.2 Remoción de Gas Ácido

En un sistema de incineración, especialmente en un sistema de incineración de residuos peligrosos, es necesario remover los gases ácidos de la corriente de gas antes de descargarlos a la atmósfera. Los gases ácidos que normalmente se encuentran son HCl, SO₂ y HF. Ocasionalmente HBr puede estar presente. El HCl y el HF son muy solubles en agua y el HBr es ligeramente menor. El SO₂ no es soluble, así es que su remoción depende en utilizar una base como NaOH, o bien soda ash para neutralizarlo. La misma solución puede ser usada para remover HCl y HF. Los ácidos gases pueden ser removidos de un sistema húmedo o seco. Las

eficiencias de la remoción de gases ácidos varía según si el sistema es húmedo o seco. El sistema húmedo generalmente tiene una eficiencia mayor y se usa cantidades de la base utilizada para la remoción de gases ácidos cerca a los valores estequiométricos que los sistemas secos.

Los sistemas de remoción secos son:

- Inyección seca con cal - variedad de sistemas
- Lavador seco - Secador de spray

Los sistemas de remoción secos son usualmente seguidos por un filtro que colecta los gases ácidos neutralizados como sal.

Los sistemas húmedos son:

- Absorción / reacción - columnas de relleno y bandejas
- Contactores mojados - venturis / Calvert / Hidro – sonic

2.9 Opciones de Sistemas de Control

En los sistemas húmedos, el efluente es una solución de sal proveniente del ácido, como CaCl_2 , NaCl , CaSO_4 o Na_2SO_4 . Estas soluciones de sal son normalmente removidas del scrubber continuamente y tratadas en el sitio dentro del tratamiento de las aguas residuales (LaGrega *et al.*, 2001).

Los sistemas de control de emisiones provenientes de un incinerador de residuos peligrosos son diseñados para eliminar la necesidad de manejar efluentes húmedos; por esta razón, el sistema es diseñado solamente para producir residuos secos. Los flujos de los gases son enfriados alrededor de 315.24°C en un boiler o bien directamente entrando en contacto con agua o aire.

Posteriormente son expuestos a un agente neutralizante como la cal, donde es neumáticamente transmitido dentro del flujo del gas. Mientras más finas se han las partículas de la cal, se obtendrá una mejor eficiencia en la neutralización. Esto es conocido como sistema de inyección seco – seco. Ver Figura 2-9.

La cal asimismo puede ser alimentada dentro de la corriente del gas cuando esta aun permanece caliente, de manera atomizada, para que el calor proveniente del flujo de gas evapore el agua y los ácidos gases sean neutralizados por la cal.

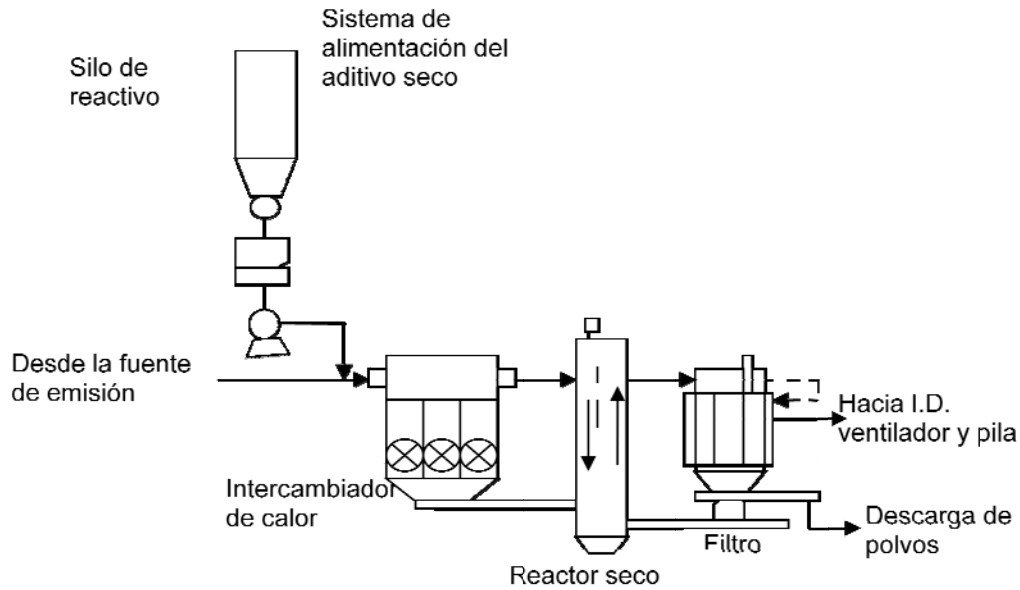


Figura 2-9 Sistema de inyección seco - seco

Esto es usualmente realizado en un secador tipo spray, algunas veces llamado depurador. La mezcla de cal – sulfito sale del secador de manera sólida, ya sea en la parte inferior de la unidad o arrastradas por el flujo de los gases. Esto es conocido como sistema seco – húmedo (Ver Figura 2-10). El hidróxido de sodio o cenizas de sosa también pueden ser usadas, pero estas son más caras que la cal y, entonces las sales de sodio son más higroscópicas, esta es la razón por la cual se prefiere utilizar cal.

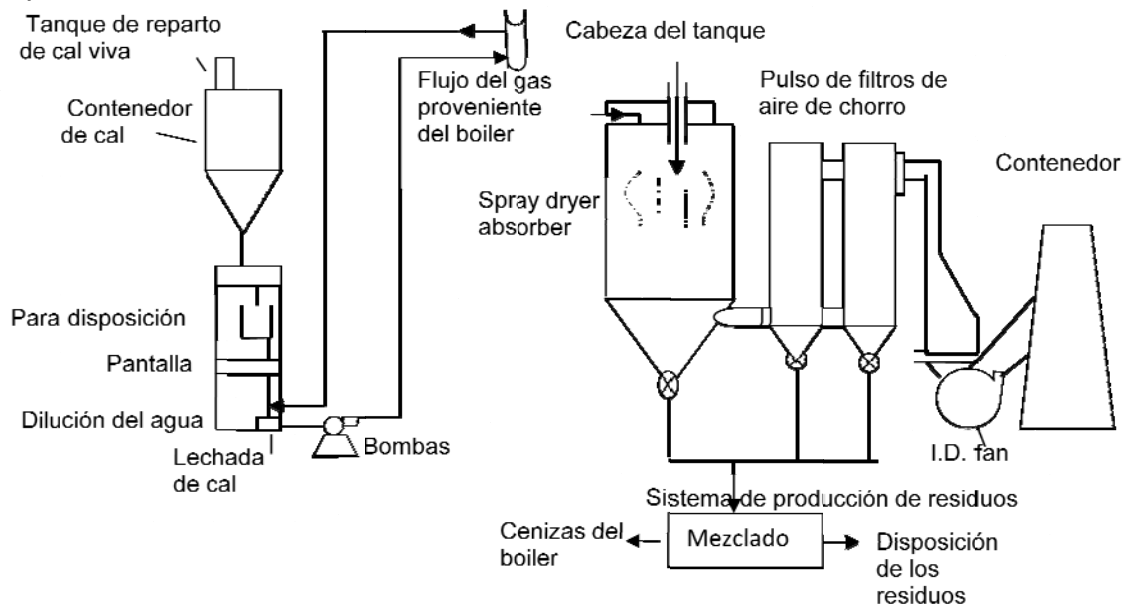


Figura 2-10 Sistema de inyección húmedo – seco

Ambos tipos de sistemas de reacción secos son seguidos por dispositivos de remoción de partículas como son precipitadores electrostáticos o filtros. Las

temperaturas de operación para estas unidades se encuentran en el rango de 176 – 232 °C. Los filtros son los más usados en la mayoría de los sistemas debido a que la reacción ácido – base comienza corriente arriba de la superficie del filtro, incrementando las eficiencias en la remoción del gas ácidos. Los gases ácidos así como las partículas son removidos del incinerador hacia el depurador seco y los filtros. A consecuencia de que la reacción entre la cal y los gases ácidos es lenta, la mezcla perfecta entre ambos es un problema, la cal hacia el gas ácido ratio debe ser de 1.5 a 2.0 veces las cantidades de reacción estequiométricas.

Complementando los sistemas húmedos para la remoción de partículas y gases ácidos son usualmente empleados después de enfriamiento adiabático donde el flujo de los gases ha estado saturado con agua a la temperatura adiabática de saturación. Donde los gases ácidos pueden fácilmente ser removidos en una columna utilizando una solución de caustico o ceniza de sosa. Diferente a los sistemas de neutralización seca, los sistemas húmedos son muy eficientes y son controlados manteniendo la depuración en solución de PH. Las partículas son removidas de la corriente de gas antes que los gases ácidos o bien en el mismo tiempo, dependiendo de la decisión del empleado. Los depuradores venturi son una opción para la remoción de partículas. Estos son simples y fuertes pero requieren una presión alta para remover partículas muy pequeñas y de esta manera cumplir con los niveles de emisión y también no tienen una eficiencia energética.

2.9.1 Ventiladores y Sopladores

Estos componentes son de primal importancia para la incineración de residuos peligrosos debido a que estos mueven el aire hacia el interior del incinerador y dirigen hacia afuera del sistema el flujo del gas. La combustión del aire en la mayoría de los incineradores es suplida por una fuerza o por un ventilador de tiro inducido o ambos. Los incineradores de residuos peligrosos son idealmente operados bajo una ligera presión para que todas las fugas se eliminaran en sí, pero muchos incineradores de inyección líquida operan bajo una presión positiva.

2.9.2 Enfriadores y condensadores

El flujo de gas a una temperatura de saturación adiabática que ha sido pasada a través de un eliminador de niebla, éste aún contiene remanentes de saturación con el agua a temperaturas arriba de la temperatura ambiental. Cuando este flujo de gas existe la pila es enfriada por la temperatura ambiente, una pluma densa de corriente es formada. Regularmente esta pluma formada en formada para ser partículas contaminantes para los seres humanos. Para superar esta pluma, muchos incineradores emplean el diseño de la condensación en el proceso para reducir el punto de condensación de los gases de chimenea, así como la reducción del mismo, si no es que la eliminación de la pluma de formación. La condensación es lograda con un sistema de contacto directo usando columnas de enfriamiento o bien empleando un condensador tubular ya sea de aire o de agua,

él cual ayude a llevar a cabo el enfriamiento del gas. En un área geográfica donde el agua sea escasa, se tiene un beneficio adicional ya que la condensación puede ser reusada en el proceso.

2.9.3 Eliminadores de niebla

El flujo de gas proveniente del incinerador, especialmente cuando este ha sido enfriado de manera adiabática en un sistema en el cual entra en contacto directo con el agua, contiene una cantidad significativa de agua. Como este gas es adicionalmente enfriado con la pérdida de calor en el ducto, pequeñas partículas de agua comienzan a formarse en la corriente de aire. Para remover estas pequeñas partículas y mantenerlas en la entrada de la pila es necesario un eliminador de vapor o de arrastre. Los eliminadores de niebla son generalmente del tipo de separación por impactación, sin embargo algunas veces los separadores centrifugas son empleados. Los separadores de impactación ya sean de alambre o almohadilla de plástico o una serie de placas, interceptan las pequeñas partículas y permite que se unan para que el agua se pueda drenar del sistema.

2.9.4 Chimenea

El final de todo sistema de incineración debe ser una chimenea para liberar y dispersar los flujos de gases a la atmosfera. Para incineradores de residuos peligrosos, el fin con el que fue creada la chimenea no se requiere ya que la fuerza que llevan los gases de combustión es alta y hace que los gases sean empujados hacia arriba. Por lo tanto, el aspecto crítico de diseño de la chimenea no es la capacidad de producir al natural la corriente de emisión, sino más bien su capacidad para dispersar los gases de combustión. La altura apropiada para la chimenea depende de las terreno circundante, proximidad de edificios, y principalmente la dirección del viento. Antes de decidir la ubicación de la chimenea y la altura, se debe de realizar un modelo de dispersión de la pluma de contaminantes emitidos a la atmosfera. El análisis de dispersión estima las concentraciones a nivel de piso, así como la ubicación de los contaminantes presentes en el flujo de emisión, con esto se pueden llevar a cabo un análisis de riesgos a la salud (LaGrega *et al.*, 2001).

3 LEGISLACIÓN

3.1 Legislación Internacional

3.1.1 Convención de Basilea

La Convención de Basilea para el control transfronterizo de residuos peligrosos y su disposición se adoptó en 1989, como respuesta a la incertidumbre de que los residuos tóxicos de los países desarrollados se enviaran para su disposición a países en vías de desarrollo o con economías de transición (SEMARNAT, 2002).

Durante la primera década de la convención se orientó a la elaboración de controles para el movimiento transfronterizo de residuos peligrosos y en el desarrollo de criterios para el manejo ambientalmente adecuado de estos residuos. Posteriormente, el trabajo de la Convención se enfocó hacia la implementación de tratados de ejecución y minimización en la generación de residuos peligrosos. Para el 15 de julio del 2002 se contaba con 151 países miembros de la Convención (SEMARNAT, 2002).

Figuran en este convenio, los cursos prácticos regionales y subregionales sobre la concienciación y la capacitación en relación con la determinación de fuentes de dioxinas y furanos y el establecimiento de inventarios de liberaciones, así como cursos prácticos regionales sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.

3.1.2 Convención Estocolmo

En mayo del año 2001, la comunidad internacional adoptó, en el marco de las Naciones Unidas, el Convenio de Estocolmo sobre Compuestos Orgánicos Persistentes (COPs) (Rosario, 2000).

Este convenio busca eliminar o minimizar la descarga de 12 de las sustancias más tóxicas conocidas por la ciencia, entre ellas las dioxinas y los furanos (Rosario, 2000).

El Convenio identifica a los incineradores de residuos entre las principales fuentes de emisión de COPs al medio ambiente. Entre ellas también se incluyen los co-incineradores y los hornos de cemento que queman residuos peligrosos (Rosario, 2000).

El Convenio requiere que las partes elaboren un plan de acción para identificar las descargas de COPs involuntarios, como las dioxinas, furanos, bifenilos policlorados (BPCs) y hexaclorobenceno, y que reduzcan o eviten nuevas fuentes, así como las ya existentes, utilizando las “mejores prácticas ambientales” y las “mejores técnicas disponibles”. Asimismo, llama a las partes a consultar a las

organizaciones interesadas para la elaboración, aplicación y actualización de su estrategia (Rosario, 2000).

Otros Convenios internacionales contra la incineración

- El Protocolo del Convenio de Londres prohibió globalmente la incineración en el mar. 1996.
- El Convenio de Bamako prohibió la incineración en el mar, y en aguas territoriales o internas en África. 1996.
- El Convenio de OSPAR prohibió la incineración en el mar del noreste Atlántico. 1992.

Se identifica a la incineración de residuos como una fuente potencial de COPs de interés prioritario dentro del Convenio de Estocolmo.

3.2 Legislación en la Comunidad Económica Europea

En la Unión Europea existe una variedad de directivas que rigen a las dioxinas y furanos desde diferentes enfoques. En la Tabla 3-1 se muestran algunas de las directivas y reglamentos aplicados en la Unión Europea para las dioxinas y los furanos, así como el enfoque de cada una de ellas (Beltrán, 2006).

Tabla 3-1 Directivas y Reglamentos de la Comunidad Europea relacionada con la regulación de dioxinas y furanos

| Directiva | Objetivo |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Directiva 2005/7/CEE | Establece los requisitos para la determinación de los niveles de dioxinas y de BPC similares a las dioxinas en los alimentos para ganado |
| Directiva 76/371/CEE | Establece el procedimiento de toma de muestra para el control oficial de los niveles de dioxinas y determinación de los niveles de BPC similares a las dioxinas en alimentos para ganado |
| Directiva 2002/32/CEE | Cumplimiento de los niveles máximos establecidos |
| Directiva 96/82/CEE | Relativa al control de los riesgos de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, más conocida como Seveso II, que sustituyó a la Seveso I de 1982. |

Fuente: Beltrán, 2006

Continuación Tabla 3-1

| Directiva | Objetivo |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Directiva 2003/105/CEE | Modifica a la directiva 96/82/CEE (Seveso II). Estas modificaciones pretenden, entre otros objetivos, dar cobertura legal para la prevención y el control de accidentes recientes que hasta ahora no estaban establecidos. |
| Reglamento (CE) No. 850/2004 | Se refiere ante todo a la protección del medio ambiente y de la salud humana |
| Directiva 2002/69/CEE | Método de toma de muestras así como los criterios de realización de los métodos de análisis |
| Directiva 2002/657/CEE | Muestra sustancias para las que se ha establecido un límite permitido |

Fuente: Beltrán, 2006

Actualmente existe la directiva 2000/76/CE publicada el 4 de diciembre del 2004 la cual establece los límites máximos permisibles de dioxinas y furanos emitidos por fuentes estacionarias (incineradores). Dicha directiva establece lo siguiente:

- El protocolo sobre los contaminantes orgánicos persistentes firmado por la comunidad en el marco del convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia de la comisión económica europea de las naciones unidas (CEPE-ONU) establece, como valores límite jurídicamente vinculantes para la emisión de dioxinas y furanos (Beltrán, 2006).

3.3 Legislación en México

Con la finalidad de prevenir alguna situación de emergencia debida al mal manejo de los RPBI, la autoridad Ambiental (SEMARNAT) publicó el 7 de noviembre de 1995 la Norma Oficial Mexicana NOM-087-SEMARNAT-1995, Que establece los requisitos para la separación, envasado, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos biológico-infecciosos que se generan en establecimientos que presten atención médica.

Debido a que esta Norma presentó algunos problemas de interpretación como en su aplicación, se gestionó en coordinación con la Secretaría de Salud, su modificación, derivándose el 1 de noviembre de 2001 el Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM- 087-SEMARNAT-SSA1-2000, Protección Ambiental - Salud Ambiental – Residuos Peligrosos Biológico-Infecciosos – Clasificación y especificaciones de manejo. De este proyecto se derivaron 370 comentarios, mismos que fueron contestados y publicados en el Diario Oficial de la Federación el día 20 de enero de 2003.

Finalmente el 17 de febrero de 2003 se publica en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, Protección Ambiental – Salud Ambiental – Residuos Peligrosos Biológico-Infeciosos – Clasificación y especificaciones de Manejo (SEMARNAT, 2009).

Las disposiciones jurídicas que aplican a la incineración de residuos, se encuentran contenidas en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, en su Reglamento, en la Norma Oficial Mexicana: NOM-098-SEMARNAT-2002, así como en el Convenio de Estocolmo (Cortinas, 2008).

Dentro del procedimiento correspondiente a la obtención del permiso para instalar y operar equipos de tratamiento de residuos peligrosos en México, se incluye la ejecución de un protocolo de pruebas (PP), entre otros requisitos. Esta condición es informada a los inversionistas o promoventes por la autoridad responsable, el Instituto Nacional de Ecología (INE), al inicio del mencionado procedimiento, ya que no existe un ordenamiento legal vigente que establezca de manera explícita y formal esta obligatoriedad (como sucede con un estudio de impacto ambiental, riesgo, etc) (Solórzano, 2000). No obstante el promovente debe de cubrir los gastos de las mismas. De manera que si el protocolo de pruebas no es aprobado, la empresa no podrá iniciar operaciones hasta que lo apruebe.

Finalmente, en la autorización para operar un incinerador de residuos peligrosos que la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas (DGMRAR) del INE entrega a los promoventes, se establece que *“La empresa... deberá presentar a este Instituto en un lapso de seis meses a partir del día siguiente de la notificación de la presente, los resultados satisfactorios del protocolo de pruebas para el tratamiento propuesto, realizados por un laboratorio acreditado, el incumplimiento a lo previsto en el presente término será causa de revocación de la presente autorización”*. Es decir, primeramente se entrega la autorización para la operación de un incinerador, pero condicionada a la ejecución del protocolo de pruebas y entrega oportuna de los resultados satisfactorios (Solórzano, 2000).

La revisión de las disposiciones contenidas en la LGPGIR, en su Reglamento, en la Norma Oficial Mexicana: NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes, así como en el Convenio de Estocolmo (convertido en Ley nacional tras de su firma por el Ejecutivo y aprobación por el Senado), llevan a considerar lo siguiente respecto de la incineración de residuos sólidos urbanos y de manejo especial (Cortinas, 2008).

En el Artículo 50 de la Ley y en los artículos 48, 49 y 51 de su reglamento citados a continuación, se indica que los incineradores de residuos peligrosos requieren autorización de la Secretaría, es decir de la SEMARNAT, y señalan algunos de los requisitos para ello (Cortinas, 2008).

Por su parte el Artículo 61 de la Ley establece que en los casos de la incineración y la termólisis (sin precisar de qué residuos), quien solicite la autorización deberá comprobar que su proyecto está basado en lo dispuesto en la normatividad aplicable (NOM-098) y es conforme a lo que establecen los convenios internacionales de los que México sea parte (en este caso el Convenio de Estocolmo) y que el país debe honrar al convertirse en Ley nacional (Cortinas, 2008).

En el caso de los equipos incineren exclusivamente Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos (RPBI) el tiempo de residencia puede ser menor a dos segundos, siempre y cuando se cumpla con los límites de emisión que aparecen en la Tabla 1 de la NOM-098-SEMARNAT-02. En esta misma tabla se pueden observar los contaminantes atmosféricos que se van a evaluar así como la frecuencia de medición y el método o norma con la que se debe de llevar a cabo la medición. La Tabla 1 de la norma se muestra en Tabla 3-2 (SEMARNAT, 2002).

Tabla 3-2 Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos

| Contaminante | Límite de Emisión | Frecuencia de Medición | Norma que aplica o método |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|----------------------------------------------------|
| CO (mg/m ³) | 63 | continuo | Infrarrojo no dispersivo y celda electroquímica |
| HCl (mg/m ³) | 15 | trimestral | NMX-AA-070-1980 |
| NO _x (mg/m ³) | 300 | semestral | Quimiluminiscencia |
| SO ₂ (mg/m ³) | 80 | semestral | NMX-AA-55-1979 |
| Partículas (mg/m ³) | 50 | semestral | NMX-AA-10-SCF1-2001 |
| 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 con vapor frío |

4 CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS INCINERADORES DE RPBI EN MÉXICO

4.1 Metodología de evaluación de los sistemas de incineración

El método de evaluación de desempeño de los sistemas de incineración se diseñó para valorar los diferentes parámetros de operación de los incineradores, de acuerdo con rangos de operación satisfactorios, basados en su mayoría en los lineamientos establecidos por la NOM-098-SEMARNAT-2004 y las normas aplicables en países donde la incineración es práctica común. Se incluyen también otros parámetros que no están directamente relacionados con el proceso de incineración, pero que deben atenderse para mejorar el desempeño general de las plantas. Así, se asignaron valores de acuerdo con una escala donde se distinguen condiciones y características de una operación ineficiente, satisfactoria o excelente, valoradas con los números 0, 1 y 2 respectivamente, como se muestra en la Tabla 4-1 (Rosas, 2002).

Tabla 4-1 Criterios aplicados para valorar el desempeño de las plantas tratadoras

| Parámetro | Rango | Valor (b) | Observaciones |
|-----------------------------|--------------|-----------|-------------------------------------------------------|
| Criterios de combustión (a) | | | |
| Temperatura en CC1 | < 800°C | 0 | Combustión incompleta |
| | 800 a 1000°C | 2 | Operación adecuada |
| | > 1000°C | 1 | Daño al material refractario |
| Temperatura en CC2 | < 850°C | 0 | Combustión incompleta |
| | 850 a 1200°C | 2 | Operación adecuada |
| | > 1200°C | 1 | Daño al material refractario |
| Tiempo de retención en CC2 | < 2 seg | 0 | Insuficiente para destrucción de compuestos orgánicos |
| | ? 2 seg | 2 | Suficiente para destrucción de compuestos orgánicos |

Fuente: Rosas, 2002.

Continuación Tabla 4-1

| Parámetro | Rango | Valor (b) | Observaciones |
|--------------------------------------------|---------------------------------|-----------|------------------------------------------------|
| Pérdida de material volátil de las cenizas | > 10% | 0 | Representa combustión incompleta |
| | 5 al 10% | 1 | Representa combustión satisfactoria |
| | <5% | 2 | Garantiza la combustión |
| Criterios para tratamientos de gases | | | |
| Control de partículas y gases ácidos | Nulo | 0 | Se emiten contaminantes a la atmósfera |
| | Básico | 1 | Hay remoción de partículas |
| | Avanzado | 2 | Hay remoción de partículas y gases ácidos |
| Temperatura de salida de los gases | > 250°C | 0 | Altas probabilidades de generación de dxn |
| | 250 a 200°C | 1 | Se reduce la generación de dxn (c) |
| | < 200°C | 2 | La generación de dxn es casi nula |
| Otros criterios importantes | | | |
| Almacenamiento de residuos | No adecuado | 0 | Genera condiciones de inseguridad en la planta |
| | Adecuado | 2 | Existe buen manejo de los residuos |
| Manejo de cenizas | s / separación | 0 | Provoca dilución y disposición inadecuada |
| | C / separación | 1 | Evita dilución |
| | C / separación y estabilización | 2 | Provee el manejo adecuado |
| Tratamiento de agua | Nulo | 0 | Provoca descarga de contaminantes |
| | Fisicoquímico | 2 | Provee tratamiento adecuado |

Fuente: Rosas, 2002.

a CC1 = cámara de combustión primaria; CC2 = cámara de combustión secundaria;

b 0 = ineficiente; 1 = satisfactorio; 2 = excelente; c dxn = dioxinas y furanos

Los criterios empleados para establecer dichos valores están basados tanto en las condiciones establecidas en la NOM-098-SEMARNAT-2002, como en la legislación y literatura internacional sobre el proceso de incineración (Rosas, 2002)

Este sistema de evaluación es realizado sólo por la autoridad competente (SEMARNAT) a las plantas tratadoras.

4.1.1 Criterios de combustión

Temperatura en la cámara de combustión primaria. Por tratarse de un proceso térmico, la temperatura es uno de los parámetros más importantes para garantizar la destrucción eficiente de los residuos. Sin embargo, para la cámara de combustión primaria existen escasas referencias, ya que este parámetro depende de diversos factores, como el tipo de residuo o de incinerador. En la literatura se reportan rangos de temperatura desde 400 a 1,600 °C, no obstante, se recomienda que en el caso de los residuos peligrosos biológico infecciosos la temperatura mínima en esta cámara de combustión sea mayor a 760 °C (Midwest Research Institute, 1989, USEPA 1990 California Air Resources Board 1992). Asimismo, se recomienda que la temperatura no exceda de 1,000 °C, debido que a partir de este punto, las cenizas pueden fundirse y provocar la incrustación de escorias en el material refractario, ocasionando deterioro en el equipo (Brunner, 1993, Rosas, 2002).

Temperatura en la cámara de combustión secundaria. Dependiendo de factores como el tipo de incinerador o de residuo, la cámara de combustión se opera entre 900 y 1,600 °C. Por su parte la NOM-098-SEMARNAT-2002 señala que aún en las condiciones más desfavorables, los incineradores deben alcanzar una temperatura mínima de 850 °C y en caso de incinerar compuestos clorados, la temperatura debe elevarse hasta $1,000 \pm 100$ °C. Estas condiciones son similares a las establecidas en la Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del consejo relativo a la incineración de residuos. La USEPA (1990), sugiere que en esta cámara la temperatura no exceda de 1,200 °C para evitar daños en el material refractario del incinerador (Rosas, 2002).

Tiempo de retención de los gases en la cámara de combustión secundaria. Existe una relación estrecha entre el tiempo de retención de los gases y la temperatura de combustión en la cámara de combustión secundaria, observándose que a mayor tiempo de retención de los gases, la temperatura necesaria para la destrucción de los residuos disminuye (Brunner, 1993). En la práctica, se recomienda que el tiempo de retención de los gases en la segunda cámara de combustión sea de uno a tres segundos, en tanto otras regulaciones coinciden en establecer un mínimo de dos segundos (Directiva 2000/76/CE: 4; NOM-098-ECOL-2000, Rosas, 2002).

Pérdida de materia volátil de las cenizas. En cenizas de fondo, la pérdida de materia volátil es una aproximación de la calidad de combustión de los residuos, debido a que estas cenizas generalmente se exponen a temperaturas iguales o mayores a los 550 °C que se especifican en la prueba estandarizada para su determinación. No obstante, en el caso de las cenizas volantes, éste no es un parámetro representativo debido a que los equipos de control de emisiones operan a temperaturas considerablemente más bajas; además de que en ocasiones se adicionan reactivos que a esa temperatura pueden representar una pérdida de peso adicional. La pérdida de materia volátil permitida en la NOM-098-ECOL-2000 es de 10%, mientras que en la regulación europea y japonesa debe ser menor a 5% (Rosas, 2002).

4.2 Eficiencia de Destrucción y Remoción (EDR)

Para determinar el compuesto de mayor dificultad presente en el residuo alimentado, es necesario tomar como base el compuesto organoclorado con mayor estabilidad térmica que se encuentre en la corriente de residuos a incinerar.

El cálculo de la eficiencia de destrucción y remoción esta dado por la fórmula:

$$EDR = \frac{A_i - E_i}{A_i} * 100\%$$

A_i = Flujo másico del componente contenido en la alimentación al incinerador, calculado por el producto de la concentración del componente de mayor dificultad de destrucción en el residuo alimentado g/h.

E_i = Flujo másico del componente de mayor dificultad de destrucción presente en el residuo alimentado contenido en las emisiones a la atmósfera y las cenizas generadas.

Dicho flujo se calcula:

$$E_i = (Q_i * G) + (m_i * M_c)$$

Donde:

Q_i = concentración de la emisión del compuesto de mayor dificultad de destrucción, g/m³.

G = caudal del gas de emisión en la chimenea, m³/h.

m_i = concentración del componente de mayor dificultad de destrucción en las cenizas, g/kg.

M_c = caudal de cenizas generadas, kg/h.

En el caso de que por cuestiones propias del proceso de incineración la cantidad de cenizas en los fondos del incinerador sea despreciable, la variable M_c será cero y el segundo término de la ecuación será despreciable.

4.3 Principales contaminantes tóxicos emitidos por los incineradores

Las cenizas producidas en los incineradores contienen un amplio espectro de contaminantes tóxicos, especialmente niveles altos de metales pesados tales como plomo, cadmio y mercurio. La presencia de dioxinas (Brigden *et al.*, 2000)

4.3.1 Dioxinas y Furanos

Las dioxinas y furanos son sustancias altamente tóxicas que son generadas en una gran variedad de procesos industriales y de combustión, que se encuentran ampliamente distribuidas en el ambiente en concentraciones muy bajas y que tienden a acumularse en los tejidos grasos de los seres vivos (Gavilán y Castro, 2005)

Gavilán y Castro. (2005) menciona que estas sustancias han sido consideradas de gran peligrosidad en los últimos años, desde el accidente de Seveso, Italia y el descubrimiento de su generación en los procesos de combustión e incineración de residuos. Esto ha motivado que en todo el mundo se hayan tomado diversas acciones, como la entrada en vigor de la Convención de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes y el Plan de Acción Regional para Dioxinas, Furanos y Hexaclorobenceno de la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte.

Actualmente, existen bastantes lagunas con respecto al conocimiento sobre estas sustancias, en particular sobre su distribución y transporte en el medio, así como sobre los niveles que resultan potencialmente peligrosos para los seres humanos. En México, aunque se tienen ciertos avances con respecto al conocimiento de estas sustancias, se requiere apoyar a las actividades de investigación para determinar tanto los niveles de afectación en el ambiente, como para identificar las fuentes generadoras más importantes y con esto determinar las mejores medidas para su control (Gavilán y Castro, 2005)

Dada la similitud estructural de estos compuestos, también presentan propiedades físico-químicas similares: son sólidos cristalinos de color blanco con puntos de fusión y ebullición elevados. También tienen una estabilidad térmica muy elevada, razón que lo hace ser muy difíciles de destruir en procesos de combustión. Estos compuestos se caracterizan por su lipofilia, la cual favorece su acumulación en los tejidos grasos del organismo de los seres vivos, y que los hace solubles en la mayoría de los disolventes orgánicos (Gavilán y Castro, 2005).

Estas sustancias nunca se han fabricado industrialmente, sin embargo, se pueden generar por diversas vías. En los procesos térmicos, a temperaturas por encima de 200°C, se generan durante la combustión incompleta de compuestos clorados. También han estado presentes en el ambiente a nivel traza debido a incendios y a la caída de relámpagos. Estas se producen como resultado de reacciones

secundarias en la fabricación de compuestos aromáticos halogenados, principalmente donde se utiliza cloro (Gavilán y Castro, 2005).

Gavilán y Castro. (2005). Hace mención que las dibenzo-para-dioxinas y dibenzofuranos (PCDD y PCDF) son compuestos con propiedades químicas similares. Cada uno comprende dos anillos de benceno interconectados por átomos de oxígeno. En el caso de las PCDD los anillos de benceno están unidos por dos átomos de oxígeno y en el caso de los PCDF los anillos están interconectados por un átomo de carbono y uno de oxígeno. En la Figura 4-1 se muestra la estructura genérica de las PCDD y PCDF.

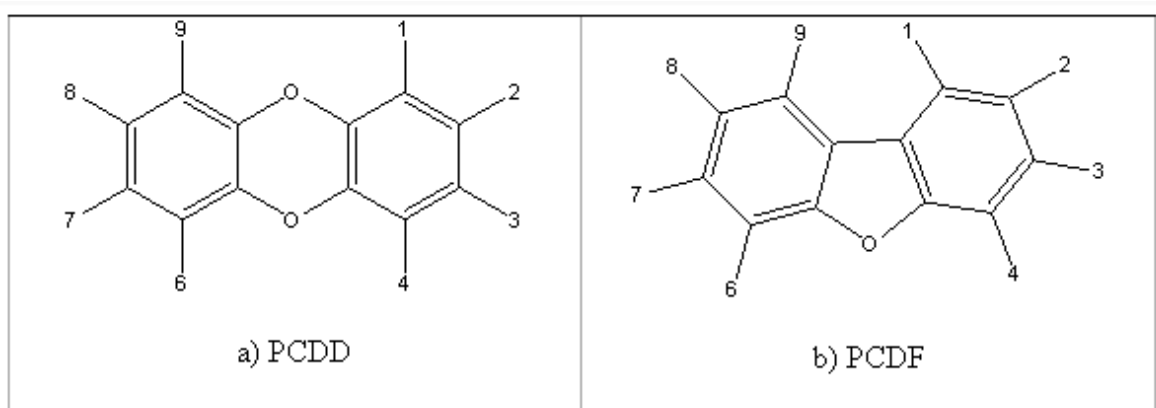


Figura 4-1 Estructura general de PCDD y PCDF (Gavilán y Castro, 2005)

Gavilán y Castro. (2005). Menciona que todas las dioxinas y furanos son sólidos orgánicos, con altos puntos de fusión y baja presión de vapor. Se caracterizan por tener una solubilidad en agua extremadamente baja y por adsorberse fuertemente en las superficies de la partícula. Al incrementarse su contenido de átomos de carbono se incrementa su solubilidad en disolventes orgánicos.

Las PCDD y PCDF constituyen dos grupos de éteres aromáticos tricíclicos casi planares. En teoría existen 75 PCDD y 135 PCDF, dependiendo del número y la posición de los átomos de cloro. Las abreviaturas normalmente utilizadas para designar los distintos congéneres de las PCDD y PCDF (Gavilán y Castro, 2005).

Las dioxinas y furanos se forman en la mayoría de los sistemas de combustión. Entre estos se encuentra la incineración de residuos (residuos sólidos municipales, lodos de planta de tratamiento, residuos médicos y residuos peligrosos); la combustión de diversos combustibles, como carbón, madera y los productos derivados del petróleo; los hornos cementeros y la quema no controlada de basura doméstica en patios (Gavilán y Castro, 2005).

4.3.1.1 Efectos a la salud y el medio ambiente

A altas o bajas dosis las dioxinas y furanos causan daños tanto en la salud pública como en el medio ambiente. Las PCDDs y PCDFs, ejercen efectos multigeneracionales sobre muchos sistemas orgánicos y numerosas especies en dosis extraordinariamente bajas, (partes por billón y aún en el intervalo del cuatrillón) (Beltrán, 2006).

Los efectos de las dioxinas y los furanos en la salud pública se clasifican por:

- Efectos a corto plazo: lesiones en la piel, tales como cloroacné y manchas oscuras en ella (hiperpigmentación), y alteraciones en las funciones del hígado.
- Efectos a largo plazo: cáncer, diabetes, daños neurológicos (desorden en el aprendizaje, y efectos en el comportamiento), deterioro en el sistema reproductivo (pérdida del esperma, defectos de nacimiento, disminución en las hormonas sexuales masculinas), disminución en la respuesta inmune, endometriosis y trastornos endocrinos.

El efecto más conocido sobre la salud de seres humanos expuestos a una gran cantidad de dioxinas y furanos es cloroacné. El cloroacné es una enfermedad grave de la piel con lesiones parecidas al acné principalmente en la cara y en mayor parte superior del cuerpo. Ver Figura 4-2.



Figura 4-2 Efecto producido por las dioxinas y furanos (cloroacné)

La capacidad toxicológica de las dioxinas y furanos es demasiado alta y por consiguiente arroja una serie amplia de enfermedades que puede causar. A continuación se resumen en la Tabla 4-2 algunos de los daños a la salud que pueden resultar de la exposición a altos niveles de dioxinas y furanos (Beltrán, 2006).

Tabla 4-2 Efectos producidos por dioxinas y furanos

| AFECTACIÓN | | | | |
|---------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Cáncer | Sistema Reproductor Masculino | Sistema Reproductor Femenino | Efectos en fetos | Alteraciones Cutáneas |
| Hígado | Disminución del no. de espermatozoides | Cambios hormonales | Alteraciones en el sistema reproductor (feminización) | Cloroacné o acné clórica |
| Pulmones | Atrofia testicular | Disminución de la fertilidad | Problemas neurológicos y de desarrollo | Hiperpigmentación |
| Glándulas tiroides | Alteraciones en los niveles de hormonas | Abortos | | Hirsutismo (crecimiento de vello corporal) |
| Piel | Feminización | | | |
| Boca, etc. | | | | |

4.3.2 Metales pesados

Los metales pesados no se destruyen (no son oxidables) por la incineración sino que simplemente se concentran en las cenizas resultantes, o son liberados al ambiente a través de las emisiones de la chimenea. Las concentraciones de metales pesados en las cenizas son altamente dependientes de las cantidades de estos metales en los residuos que se incineran (Brigden *et al.*, 2000).

De cualquier manera si se les desea monitorear, ellos se ven reflejados en las partículas y en los residuos de la combustión.

Los metales pesados ejercen un extenso rango de efectos tóxicos para los humanos, vida acuática y terrestre, y plantas. Varios de estos metales también tienen el potencial de bioacumularse, incluyendo el cadmio, cromo, plomo, mercurio y zinc (USPHS 1997, Kimbrough *et al.* 1999, MINDEC 1995). Además, ciertas formas del cadmio y cromo tienen propiedades cancerígenas (USPHS, 1998).

4.3.3 Mercurio

La Agencia Ambiental Europea (EEA 2000) advierte que la separación del mercurio es un problema especial en la incineración (Brigden *et al.*, 2000).

Casi 100% del mercurio elemental presente en el desecho es emitido en los gases de chimenea debido a que no se fija bien al polvo retenido por los filtros o a las cenizas. El mercurio elemental constituye cerca del 20 a 50% del total de las emisiones de mercurio. El resto está en la forma de mercurio divalente, el cual puede ser predominantemente cloruro de mercurio ($HgCl_2$). Después de su emisión a la atmósfera, el mercurio divalente, el cual es soluble en agua, puede depositarse cerca del incinerador. Por otro lado, el mercurio elemental puede ser transportado largas distancias en las corrientes de aire antes de que eventualmente sea convertido a su forma divalente y pueda ser depositado una vez más en la tierra. (Carpi, 1997).

La incineración de residuos es una importante fuente de emisión de mercurio al medio ambiente. El mercurio es bioacumulativo, y produce daños en el organismo a dosis muy bajas. Ataca el sistema nervioso central, puede dañar los riñones y los pulmones, y puede atravesar la placenta y la barrera hematoencefálica (Rosario, 2000).

4.3.3.1 Efectos a la salud

El Mercurio tiene un número de efectos sobre los humanos, que pueden ser todos simplificados en las siguientes principalmente:

- Daño al sistema nervioso
- Daño a las funciones del cerebro
- Daño al ADN y cromosomas
- Reacciones alérgicas, irritación de la piel, cansancio, y dolor de cabeza
- Efectos negativos en la reproducción, daño en el esperma, defectos de nacimientos y abortos

El daño a las funciones del cerebro puede causar la degradación de la habilidad para aprender, cambios en la personalidad, temblores, cambios en la visión, sordera, incoordinación de músculos y pérdida de la memoria. Daño en el cromosoma y es conocido que causa mongolismo (Lenntech, 2010).

4.3.3.2 Efectos sobre el medio

La mayoría del Mercurio liberado por las actividades humanas es liberado al aire, a través de la quema de productos fósiles, minería, fundiciones y la incineración de residuos.

Aguas superficiales ácidas pueden contener significantes cantidades de Mercurio. Cuando los valores de pH están entre cinco y siete, las concentraciones de mercurio en el agua se incrementarán debido a la movilización del mercurio en el suelo. El mercurio que ha alcanzado las aguas superficiales o suelos los microorganismos pueden convertirlo en metil mercurio, una substancia que puede ser absorbida rápidamente por la mayoría de los organismos y es conocido que

daña al sistema nervioso. Los peces son organismos que absorben gran cantidad de metil mercurio de agua superficial cada día. Como consecuencia, el metil mercurio puede acumularse en peces y en las cadenas alimenticias de las que forman parte (Lenntech, 2010).

4.3.4 Partículas ultra finas

Entre las partículas que la incineración libera a la atmósfera se encuentran las partículas ultra finas [partículas finas menores de $0.1 \mu\text{m}$ se denominan ($\text{PM}_{0.1}$)], que por su ínfimo tamaño no son capturadas por los equipos de control de la contaminación. Son por ende liberadas a la atmósfera, donde pueden permanecer por períodos prolongados, e ingresan fácilmente al organismo ya que tampoco son filtradas por los mecanismos naturales del cuerpo (Rosario, 2000).

Estas partículas transportan metales pesados, dioxinas y compuestos similares. Algunos metales pesados, al ser liberados en forma de partículas ultra finas, adquieren mayor potencial de daño ambiental y sanitario que el que tenían en la masa original de residuos (Rosario, 2000).

Las partículas ultra finas han sido relacionadas con una variedad de problemas en la salud, incluyendo asma, problemas en el funcionamiento de los pulmones y problemas cardíacos (Rosario, 2000).

Jiménez (2001). Menciona que las partículas pertenecientes a la fracción respirable ($<10\mu\text{m}$) aproximadamente un tercio se queda en los pulmones y el efecto que causan depende de su composición química aunque, en general, se considera que producen irritación de las vías respiratorias, agravan el asma y favorecen las enfermedades cardiovasculares. Las partículas pueden servir de superficie de adsorción para gases tóxicos. En la Tabla 4-3 se presentan los efectos de las partículas en la salud de acuerdo con las concentraciones que se tengan en el medio ambiente.

Tabla 4-3 Efectos de las partículas en la salud

| CONCENTRACIÓN $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | JUNTO CON: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | TIEMPO | EFFECTOS |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 750 | 715 de SO_2 | 24 h | Aumento considerable promedio de las enfermedades |
| 300 | 630 de SO_2 | 24 h | Aumento considerable promedio de las molestias en los pacientes con bronquitis crónica |
| 200 | 250 de SO_2 | 24 h | Aumento del promedio de ausentismo en las industrias |
| 80 - 100 | Tasa de sulfatación $950 \text{ mg}/\text{cm}^2$ | | Aumento geométrico de la tasa de defunción en la población de 50 a 69 años |

A corto plazo la contaminación por partículas finas puede causar el deterioro de la función respiratoria; a largo plazo, contribuye a generar enfermedades crónicas, cáncer y muerte prematura.

Las partículas atmosféricas tienen tanto efectos directos, ejercidos por la dispersión y absorción de la radiación, como efectos indirectos al cambiar la estructura microfísica, tiempos de vida y cantidades de nube, debido a la capacidad de las partículas atmosféricas de actuar como núcleos de condensación en que el vapor de agua se condensa para formar las gotas microscópicas que constituyen las nubes. Las partículas interactúan con la radiación muy fuertemente y la dispersan siempre y cuando aquella posea una longitud de onda similar al tamaño de las partículas. La mayor parte de la energía solar entrante tiene una longitud de onda menor de $4\mu\text{m}$ y la mayoría de las partículas son más pequeñas que $4\mu\text{m}$, por lo que el principal efecto de las partículas atmosféricas es dispersar la radiación de la energía solar entrante, lo cual tiene un efecto enfriador en la atmósfera. Algunos tipos de partículas, como aquellos compuestos de carbono negro y hollín, absorben la radiación solar entrante, calentando la atmósfera (Manahan, 2007).

Las partículas reflejan y absorben parte de la energía solar, por lo que se habla de un decremento de la temperatura de la Tierra. Además, actúan como núcleos de condensación de lluvia y nieve (Jiménez, 2001).

4.4 Efectos a la salud y el medio ambiente provocados por equipos incineradores de RPBI

Se han hecho algunas tentativas de verificar que las concentraciones previstas de contaminantes aerotransportados son reflejadas por los niveles medidos, pero en la mayoría de los casos las concentraciones previstas del aire y del suelo son menores a los límites de detección y siempre dentro de la variabilidad del fondo (Travis y Cook, 1989).

4.4.1 Efectos a la salud

La caracterización de efectos potenciales sobre la salud humana expuesta a los peligros del medio ambiente, implica cuatro pasos consecutivos:

1. Identificación.- determinación de si un producto químico puede ser un peligro potencial para la salud de los seres humanos
2. Grado de la exposición.- determinación del grado de exposición humana al producto químico tóxico.
3. Determinar el riesgo.- la determinación de la relación entre la magnitud de la exposición y la probabilidad de ocurrencia de efectos sobre la salud.
4. Caracterización del riesgo.- es al combinación de los tres puntos anteriores para estimar el riesgo a la salud asociada con la exposición hacia la sustancia a investigar (Travis y Cook, 1989).

Estimando los riesgos a la salud humana debido a la incineración de residuos peligrosos, dos medidas del riesgo se emplean generalmente: riesgo individual del máximo y riesgo de la población.

La vía primaria de exposición humana a los agentes contaminadores durante la incineración de los residuos peligrosos es la inhalación. Es por esto que es necesario estimar las concentraciones de los contaminantes, viento abajo (Travis y Cook, 1989).

La otra vía de exposición humana a los contaminantes atmosféricos provenientes de incineradores de residuos peligrosos es por ingesta.

El dióxido de azufre provoca irritación del tracto respiratorio, agrava la bronquitis, disminuye la actividad de los cilios y favorece el enfisema pulmonar.

Se ha observado aumento en la mortalidad en la población en general cuando las concentraciones tanto de partículas en suspensión como de óxidos de azufre exceden $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ (equivalente a 0.19ppm de SO_2) durante 24 horas.

La cantidad aceptada de inhalación de algunos contaminantes se muestran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4 Dosis diarias admisibles

| Contaminantes | ADI (mg/día) |
|----------------------|---------------------|
| Plomo | 0.0045 |
| Mercurio | 0.020 |
| Dioxinas | 0.01 pg/kgdía |

Todos los contaminantes emitidos a la atmósfera por un incinerador de RPBI son dañinos, sin embargo hay algunos como los observados en la Tabla 4-4 que por su nivel de toxicidad representan un mayor riesgo a la salud. Rebasando las dosis diarias admisibles de estos contaminantes puede ser letal.

La mayoría de los efectos que pueden ocasionar los contaminantes provenientes de incineradoras de RPBI son crónicos por lo que se podrían observar a largo plazo.

Los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-098-SEMARNAT-SSA1-2002 causan efectos hacia la salud y el ambiente, sin embargo estos efectos son poco significativos considerando una sola fuente de emisión. La realidad es que no existe sólo una fuente y las emisiones en una zona son varias por lo que se sugiere que las empresas incineradoras logren emitir concentraciones por debajo de los establecidos en la norma.

4.4.2 Efectos al ambiente

Los riesgos ambientales son complicados por la necesidad de considerar especies múltiples y sus interacciones en caracterizar riesgos potenciales. Hay preguntas interesantes con respecto a qué representa impactos potencialmente significativos, así como qué características específicas deben ser proporcionadas.

Para evaluar los efectos hacia el medio ambiente asociados con la incineración de residuos peligrosos se puede esperar que involucre factores ambientales complejos debido al potencial de deposición extensa de los contaminantes y la diversidad de los factores estresados que pueden ser alterados.

La caracterización de las características ecológicas de un área potencialmente afectada y la evaluación de los factores estresados particulares, se anticipan que son las bases para seleccionar los recursos que necesitan ser considerados y los puntos del extremo del riesgo que pueden ser evaluados.

El primer problema al desarrollar un plan de riesgos ambientales provenientes de un incinerador de residuos peligrosos es la de caracterizar el área que va a ser evaluada. Caracterizar los impactos potenciales de una incineración de residuos peligrosos en el área a evaluar por el motivo de preocupación ambiental, pueden ser establecidos generalmente basados en la historia y en el muestreo del sitio. Debido a que la naturaleza de las emisiones provenientes de los incineradores, el área afectada de la deposición de los contaminantes, puede ser grande y no está sujeta a cuestiones geográficas y geológicas.

La altura en la cual se lanzan las emisiones, las corrientes de aire, y las direcciones son algunos de los factores primarios que determinan el área potencialmente contaminada. En la evaluación de la incineración como opción, la meta es poder predecir los riesgos potenciales que pudieron resultar, no apenas para estimar riesgos después del hecho; por lo tanto, el método se debe aplicar a menudo en la ausencia de contaminación existente para muestrear.

Para esto se requiere un modelo en el cual se observa la dispersión de los contaminantes, de esta forma se puede caracterizar donde ocurre la deposición, así como en qué cantidad y nivel, agregando al incierto asociado con la determinación más allá del horizonte el tamaño del área potencialmente afectada y el grado de la contaminación.

Caracterizar los impactos potenciales de una incineradora de residuos peligrosos, está basada en las características ecológicas relevantes del área. Posteriormente se requiere de una herramienta para que los responsables que evalúan los riesgos de la incineración, piensen en estrategias alternas para ocuparse de las emisiones provenientes del incinerador (Roberts *et al.*, 1999).

Por lo que en todos los casos de operación de un equipo incinerador, se tendrán efectos hacia la salud y el medio ambiente. El punto es tratar de minimizarlos éstos efectos, esto se puede lograr principalmente con una buena operación del equipo y con un óptimo sistema de control de emisiones.

5 BASE TEÓRICA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES MEDIANTE FACTORES DE EMISIÓN

Los factores de emisión y los inventarios de emisiones han sido herramientas fundamentales para la gestión de la calidad del aire. Las estimaciones de las emisiones son importantes para el desarrollo de estrategias de control de emisiones, la determinación de la aplicabilidad de los permisos y programas de control, determinar los efectos de las fuentes y estrategias apropiadas de mitigación, y un número de otras aplicaciones relacionadas por una serie de usuarios, incluidos los federales, estatales y locales, consultores, y la industria.

Los datos de ensayos sobre las emisiones específicas de las fuentes o los monitoreos continuos de emisiones son generalmente preferidos para la estimación de las emisiones de una fuente, esto se debe a que los datos proporcionan la mejor representación de las emisiones de la fuente de prueba. Sin embargo, datos de prueba a partir de fuentes individuales no siempre están disponibles y, aún así, no pueden reflejar la variabilidad de las emisiones reales en el tiempo. Así, los factores de emisión son con frecuencia la mejor o único método disponible para estimar las emisiones, a pesar de sus limitaciones (USEPA, 2010).

5.1 Definición de un factor de emisión

Un factor de emisión es un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada con el lanzamiento de dicho contaminante. Estos factores se expresan normalmente como el peso de contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración de la actividad emisión del contaminante (por ejemplo, kilogramos de partículas emitidas por megagramo de carbón quemado). Estos factores facilitan la estimación de las emisiones procedentes de diversas fuentes de contaminación del aire. En la mayoría de los casos, estos factores son simplemente promedios de todos los datos disponibles de calidad aceptable, y en general se supone que sean representativos de los promedios a largo plazo para todas las instalaciones en la categoría de fuente (es decir, un promedio de la población).

La ecuación general para la estimación de emisiones es la siguiente:

$$E = A * EF * (1-ER/100)$$

Donde:

E = emisiones,
A = tasa de actividad,

EF = factor de emisión, y

ER = eficiencia de reducción de emisión total, %.

ER se define como el producto de la destrucción del dispositivo de control o eliminación de la eficiencia y la eficacia en la captura del sistema de control. Cuando la estimación de emisiones para un período de tiempo largo (por ejemplo, un año), tanto en el dispositivo y las condiciones de eficacia en la captura debería representar períodos, así como operaciones de rutina.

El grado de exhaustividad y detalle de la información sobre emisiones en el AP-42 está determinado por la información disponible de referencias publicadas. Las emisiones procedentes de algunos procesos están mejor documentados que otros. Por ejemplo, existen varios factores de emisión pueden ser listados para la producción de una sustancia: un factor para cada uno de una serie de pasos en el proceso de producción, tales como la neutralización, el secado, la destilación, y otras operaciones. Sin embargo, debido a la falta de una amplia información, sólo un factor de emisión se puede dar por planta de producción para otra sustancia, aunque las emisiones son probablemente producidas durante varios procesos intermedios. Puede haber más de un factor de emisión para la producción de una determinada sustancia, ya que diferentes procesos de producción pueden existir, o porque los diferentes dispositivos de control pueden ser utilizados. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta algo más que el factor de emisión para una aplicación particular y observar los detalles en el texto y en las notas del proceso.

El hecho de que un factor de emisión de un contaminante o proceso no está disponible en la USEPA no implica que la Agencia considere que la fuente no emite contaminantes, o que la fuente no debe figurar en el inventario, sólo que la USEPA no tiene suficientes datos para generar resultado alguno.

5.2 Usos de los Factores de Emisión

Los factores de emisión pueden ser apropiados para su uso en una serie de situaciones tales como hacer estimaciones de las emisiones en fuentes específicas de los inventarios de toda el área. Estos inventarios poseen varios propósitos incluyendo modelos de dispersión, desarrollo de estrategias de control, y en la detección de fuentes para las investigaciones de cumplimiento de la normatividad. Los factores de emisión también pueden ser usados apropiadamente en algunas aplicaciones, como en el establecimiento de las cuotas de permisos de funcionamiento.

Los factores de emisión en la AP-42 esencialmente representan un promedio de un intervalo de tasas de emisión, aproximadamente la mitad de las fuentes tendrán tasas de emisión mayor que el factor de emisión y la otra mitad tienen tasas de emisión inferior a la de los factores. Por lo tanto, un límite de permiso de

uso de un factor de emisión AP-42 daría lugar a la mitad de las fuentes que están en incumplimiento.

Como se ha indicado, las pruebas específicas de las fuentes o los monitoreos continuos de emisiones pueden determinar la contribución real de contaminantes desde una fuente existente mejor que los factores de emisión. Incluso entonces, los resultados serán aplicables únicamente a las condiciones existentes en el momento de la prueba o control. Para proporcionar la mejor estimación a largo plazo (por ejemplo, anual o típico día) las emisiones, estas condiciones deben ser representativas de las operaciones de rutina de la fuente.

Un enfoque de balance de materiales también puede proporcionar estimaciones fiables de las emisiones promedio de fuentes específicas. Para algunas fuentes, un balance de materia puede proporcionar una mejor estimación de las emisiones que las pruebas de emisión. En general, los balances de materiales son apropiados para su uso en situaciones en las que se pierde un alto porcentaje de material a la atmósfera (por ejemplo, el azufre en el combustible, o solvente perdido en un proceso de revestimiento no controlado). En cambio, los balances de materiales pueden ser inapropiados cuando el material es consumido o químicamente combinado en el proceso, o cuando las pérdidas a la atmósfera son una pequeña parte del rendimiento total del proceso. Como el término lo indica, es necesario tomar en cuenta todos los materiales que entran y salen del proceso para este tipo de estimación de las emisiones para que este pueda ser creíble.

Si los datos específicos de origen de los equipos no se pueden conseguir, así como las garantías de rendimiento de emisiones o datos de prueba reales de equipos similares, la mejor fuente de información para estimar las emisiones es el uso de los factores de emisión del AP-42. Cuando esta información no está disponible, el uso de factores de emisión puede ser necesario como último recurso. Cuando se utilizan factores, uno debe ser consciente de sus limitaciones en precisión que representa una planta, y los riesgos del uso de factores de emisión en este tipo de situaciones se deben evaluar los costos de los nuevos ensayos o análisis.

5.3 Clasificación de los factores de emisión

A cada factor de emisión del AP-42 se le otorga una calificación de la A - E, siendo A la mejor. Un factor de evaluación es una indicación general de la fiabilidad, robustez, de ese factor. Esta calificación se asigna sobre la base de la confiabilidad estimada de las pruebas utilizadas para desarrollar el factor y tanto en la cantidad y las características representativas de dichos datos. En general, los factores sobre la base de muchas observaciones, o en los procedimientos de prueba más ampliamente aceptadas, se asignan graduaciones más altas. Por el contrario, un factor basado en una única observación de dudosa calidad, o una extrapolación de otro factor de un proceso similar, probablemente sería más baja la puntuación. Porque las valoraciones son subjetivas y sólo indirectamente en

cuenta de la dispersión inherente entre los datos utilizados para calcular los factores, las calificaciones deben considerarse únicamente como aproximaciones. Las puntuaciones de los factores en el AP-42 no implican límites estadísticos de error o los intervalos de confianza sobre cada factor de emisión. Una calificación debe ser considerada como un indicador de la certeza y la precisión de un determinado factor utilizado para calcular las emisiones de un gran número de fuentes. Este indicador es en gran medida un reflejo de la opinión profesional de los autores del AP-42 y los revisores en cuanto a la fiabilidad de las estimaciones derivadas de estos factores.

Debido a que los factores de emisión se pueden basar en las pruebas de origen, el modelado del balance de masa, u otra información, las calificaciones de los factores puede variar enormemente. Algunos factores han sido a través de más de garantía de calidad rigurosos que otros.

Dos son las distintas etapas en la determinación de factor de clasificación. El primer paso es una evaluación de calidad de los datos, la fiabilidad de los datos de emisión de base que se utiliza para desarrollar el factor. El segundo paso es una evaluación de la capacidad del factor de presentarse como un factor anual nacional de emisiones medias de los que la actividad de origen.

Prueba de calidad de los datos se clasifica de la A - D, y están asignados así:

- A Las pruebas son realizadas por una metodología sólida y se presentan con suficiente detalle para la validación adecuada
- B Los ensayos se efectuarán en una metodología general, el sonido, pero sin detalles suficientes para la validación adecuada
- C Las pruebas se basan en una metodología no probadas o nuevas, o en ausencia de una cantidad significativa de información de antecedentes
- D Las pruebas se basan en un método generalmente aceptable, pero el método puede proporcionar un valor del orden de magnitud para la fuente

La calificación de AP-42 de datos ayuda a identificar buenos datos, incluso cuando no es posible extraer un factor de representante de una fuente típica en la categoría de los datos. Por ejemplo, los datos de una prueba determinada puede ser bastante bueno para un índice de calidad de datos de "A", pero la prueba puede ser de una materia prima única, o las especificaciones de producción puede ser más o menos estrictas que en la instalación típica .

El número del factor de emisión del AP-42, es una evaluación general de lo bueno que es un factor, basado tanto en la calidad de la prueba (s) o la información que es la fuente del factor y de lo bien que el factor representa la fuente de emisión. Las clasificaciones más altas son los factores sobre la base de muchas observaciones imparciales, o en los procedimientos de ensayo ampliamente aceptados. Por ejemplo, diez o más fuentes diferentes pruebas en las plantas seleccionadas al azar es probable que se les asignará un clasificación "A" si todas las pruebas se realizan en un único método válido de medición de referencia. Del

mismo modo, una sola observación sobre la base de métodos cuestionables de la prueba se asignaría una "E", y un factor de extrapolación de los factores de mayor puntuación para procesos similares que se le asignará una "D" o una "E".

Las puntuaciones de los factores del AP-42 en cuanto a la calidad son asignados de esta manera:

- R Excelente. El factor es desarrollado a partir de A y B los datos de origen con calificación de ensayo de muchas instalaciones elegidas al azar en la población de la industria. La población categoría de fuente es lo suficientemente específica para minimizar la variabilidad.
- B Encima de la media. El factor es desarrollado a partir de A o datos de prueba con calificación B de un número "razonable" de las instalaciones. Aunque no hay sesgo específico es evidente, no está claro si las instalaciones de prueba son una muestra aleatoria de la industria. Al igual que con una calificación de A, la población categoría de fuente es lo suficientemente específica para minimizar la variabilidad.
- C Media. Factor es desarrollado a partir de A-, B-, y / o datos de prueba C-nominal de un número razonable de las instalaciones. Aunque no hay sesgo específico es evidente, no está claro si las instalaciones de prueba son una muestra aleatoria de la industria. Al igual que con la calificación A, la población categoría de fuente es lo suficientemente específica para minimizar la variabilidad,
- D Debajo de la media. Factor es desarrollado a partir de A-, B- y/o datos de prueba C nominal de un pequeño número de instalaciones, y puede haber motivos para sospechar que estas disposiciones no representan una muestra aleatoria de la industria. También puede haber evidencia de variabilidad dentro de la población de origen.
- E Pobres. Factor es desarrollado a partir de C y datos de ensayos D clasificado, y puede haber motivos para sospechar que las instalaciones de prueba no representan una muestra aleatoria de la industria. También puede haber evidencia de variabilidad dentro de la población la categoría de fuentes (USEPA, 2010).

La fuente de consulta más extensa para factores de emisión con base en procesos es el documento AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors (USEPA, 1995) el cual contiene los factores de emisión determinados en Estados Unidos para una gran cantidad de actividades. La referencia principal para factores de emisión específicos para contaminantes tóxicos del aire es el sistema de datos FIRE (U.S. EPA, 1995b). Otro documento de referencia es la guía Rapid Source Inventory Technique publicado por la Organización Mundial de la Salud OMS, donde se encuentran factores de emisión para diversos conjuntos de fuentes (INE, 2005).

Para utilizar los factores de emisión se requiere conocer la carga de alimentación al incinerador, así como el tratamiento de control con que se cuente o se planea contar.

Se debe de convertir la carga de alimentación a lb /hr, la fórmula a utilizar es la siguiente:

$$\text{Carga de alimentación (lb/hr)} = \text{carga de alimentación (kg/hr)} * 2.2046$$

Posteriormente se debe de observar en la Tabla 2-3-1 de la sección 2.6 llamada “incineración de residuos hospitalarios” del AP-42, ésta tabla se puede visualizar en manera de guía en la Tabla 5-1, el factor de emisión del contaminante que se desee obtener. Una vez obtenido el valor de tabla, se procede a calcularlo, se debe de conocer la tasa de emisión del contaminante para poder calcular el factor de emisión del mismo.

$$\text{EF1 (factor de emisión, lb/ton)} = \frac{2,000 * \text{tasa de emisión (lb/hr)}}{\text{carga de alimentación (lb/hr)}}$$

$$\text{EF2 (mg/Mg)} = \frac{1,000,000 * \text{tasa de emisión (g/hr)}}{\text{carga de alimentación (kg/hr)}}$$

Tabla 5-1 Factores de Emisión de Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Azufre (SO₂) para incineradores de residuos biológico infecciosos que operan con aire controlado

| Nivel de control | NO _x | | | CO | | | SO ₂ | | |
|------------------------------------|-----------------|--------|------------------------|----------|--------|------------------------|-----------------|--------|------------------------|
| | lb / ton | Kg/ Mg | Emission Factor Rating | lb / ton | Kg/ Mg | Emission Factor Rating | lb / ton | Kg/ Mg | Emission Factor Rating |
| No controlado | 3.56E+00 | | A | 2.95E+00 | | A | 2.17E+00 | | |
| Baja temperatura en el scrubber FF | 1.78E+00 | | | 1.48E+00 | | | 3.75E-01 | | |
| Media energía en el scrubber FF | | | | | | | 8.45E-01 | | |
| Baja energía en el scrubber | | | | | | | 2.09E+00 | | |
| Alta energía en el scrubber | | | | | | | 2.57E-02 | | |
| DSI / FF | | | | | | | 3.83E-01 | | |
| DSI/inyección de carbón/FF | | | | | | | 7.14E-01 | | |
| DSI/FF/Scrubber | | | | | | | 1.51E-01 | | |
| DSI/ESP | | | | | | | | | |

Se procede a calcular los factores de emisión de todos aquellos contaminantes que se deseen y que estén disponibles en el AP-42 (NO_x, SO₂, CO, partículas, Pb, TOC (componentes orgánicos totales), HCl, PCBs, Al, Sb, As, Ba, Cd, Be, Cr, Cu, Fe, Mn, Hg, Ni, Ta, Ag, SO₃, HBr, Cl, TCDD, TCDF).

6 BASE TEÓRICA PARA LA ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES MEDIANTE MODELOS DE DISPERSIÓN

6.1 Introducción

Hernández (2007). Menciona que los modelos de dispersión son un método para calcular la concentración de contaminantes a nivel del suelo y a diversas distancias de la fuente. En la elaboración de modelos se usan representaciones matemáticas de los factores que afectan la dispersión de contaminantes.

Los modelos de dispersión se han convertido en una herramienta indispensable para el estudio de la contaminación atmosférica y la planeación urbana e industrial. Desde el punto de vista de la dispersión de los contaminantes, la modelación se utiliza para saber entre otras cosas, como variar el tiempo y el espacio, la concentración de una sustancia de interés identificada como un contaminante, con el propósito de predecir y analizar la calidad del aire y de esta forma colaborar en las decisiones políticas y de planificación respecto a la gestión, mediante el desarrollo de planes, programas, proyectos y normas de emisión y de calidad del aire (Hernández, 2007).

El modelado de la dispersión de los contaminantes, es la representación matemática de qué sucede con las emisiones provenientes de un incinerador de residuos peligrosos, dando como resultado predicciones de las concentraciones del contaminante a varias distancias del incinerador. Estos modelos se extienden en la sofisticación, pero incluso el modelo más simple requiere de una computadora (Calvin, 1993).

El modelado no es definitivamente el 100% exacto, la gran cantidad de datos requeridos para la entrada al modelo no se puede saber con certeza absoluta.

A pesar de sus desventajas, un modelo de dispersión se debe aplicar por varias razones. Primero, ya que es imposible medir el impacto real de manera fácil de algo que no esté todavía en existencia. No obstante, es crucial tener una estimación de lo que pueden causar esos impactos antes de permitir que la fuente emisora sea construida. En segundo lugar, para aquellos incineradores de residuos peligrosos que existen, los programas podrían ser 1,000 veces más costosos comparados con los modelos. Tercero, los modelos ayudan a identificar las áreas vulnerables, los parámetros críticos que pueden ser cambiados o bien sustituidos por unos menos nocivos. De esta forma se identifican efectos que la empresa incineradora pudiera tener y se tratan de evitarlos antes de la instalación de la misma.

Finalmente, el modelo puede no ser 100% exacto, pero es preciso (reproducible). Por lo que al utilizar un modelo provee un criterio imparcial y reproducible. Por todas estas razones, los modelos son buenas herramientas (Roberts *et al.*, 1999) Cuando se aplica un modelo de transporte y dispersión de contaminantes en la atmósfera se recopila información específica sobre la fuente de emisión. Esta información incluye la ubicación del punto de emisión (longitud y latitud), la cantidad y tipo de contaminantes emitidos, condiciones de la corriente gaseosa de la chimenea, altura de la chimenea y factores meteorológicos tales como la velocidad del viento, perfil de la temperatura ambiente y presión atmosférica. Los científicos usan esta información como datos de entrada al modelo de computación y para predecir cómo los contaminantes se dispersarán en la atmósfera. Los niveles de concentración pueden calcularse a diversas direcciones y distancias de la chimenea y alimentarse con información de la zona de estudio (meteorológica y orografía), así como condiciones de la fuente estudiada. Ver Figura 6-1.

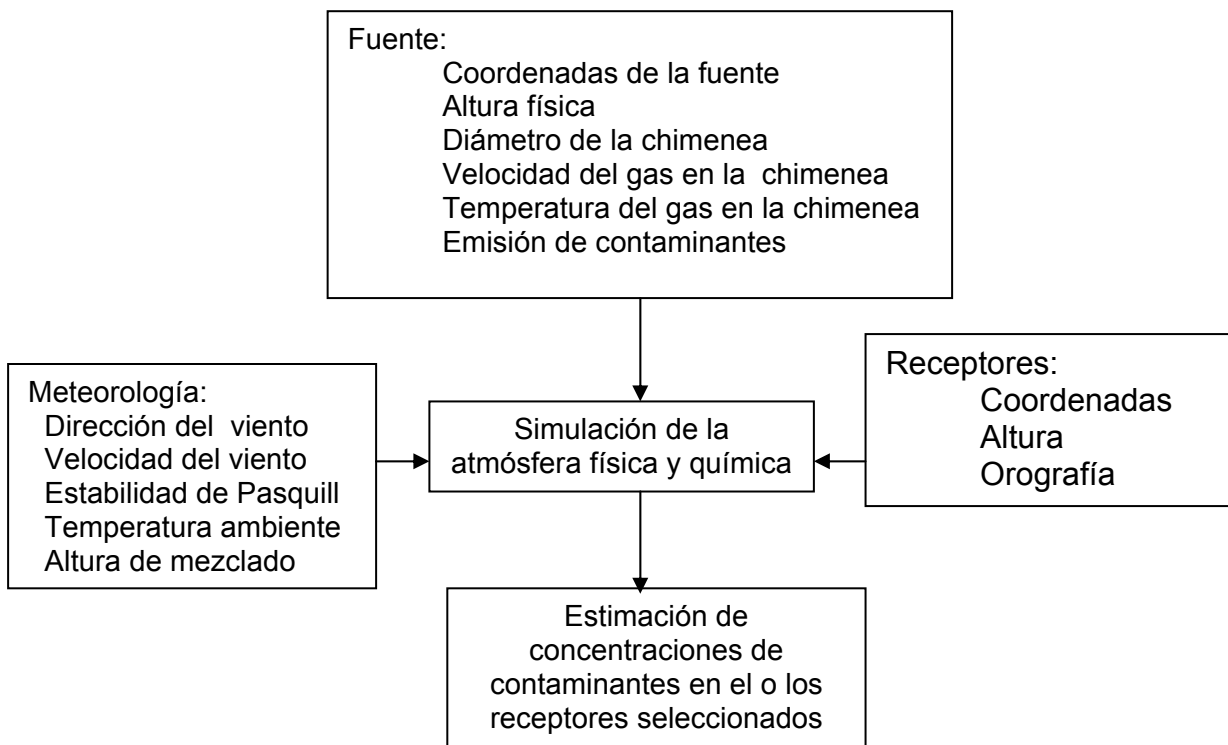


Figura 6-1 Estructura de un modelo de dispersión

Los modelos de dispersión tienen muchas aplicaciones en el control de las emisiones, pues son herramientas que ayudan a los científicos a evaluarla dispersión de los contaminantes. La exactitud de los modelos está limitada por los problemas inherentes al tratar de simplificar los factores complejos e interrelacionados que afectan el transporte y la dispersión de los contaminantes en la atmósfera (Hernández, 2007).

6.2 Utilidad de los modelos

La aplicación de los modelos de simulación puede tener diferentes propósitos entre los que destacan el desarrollo de estrategias de control; evaluación del impacto en la calidad del aire y el análisis de la tendencia de este: selección del sitio apropiado para la ubicar estaciones de monitoreo; estudios de diseño de chimeneas, etc. Estos modelos pueden variar la complejidad en la cantidad de datos de alimentación requeridos u en las formas de llegara los resultados. La capacidad para pronosticar la calidad del aire utilizando modelos matemáticos, involucra un buen número de suposiciones sobre los mecanismos de dispersión de los contaminantes, dando por resultado que a pesar de incluir muchas posibles variables contribuyentes, el resultado tiene la confiabilidad dada. Además del propio error del modelo con respecto a la realidad, este se puede incrementar en caso de no considerarse los valores de entrada adecuados al problema de interés como son las emisiones y condiciones meteorológicas principalmente, y sus limitaciones de sus como pueden ser: periodos de tiempo corto, terreno plano, contaminantes no reactivos, etc., dependiendo del modelo en cuestión (Hernández, 2007).

La aplicación de un modelo de la calidad de aire en la evaluación de estrategias de control de emisiones contaminantes a la atmósfera es una tarea compleja que demanda la integración sistemática de una gran cantidad de información generada por diferentes fuentes.

1. Un modelo específico de la calidad del aire es conveniente para la evaluación del impacto de una o varias fuentes de contaminación atmosférica, dependen de varios factores, como son:
 - La complejidad meteorológica y topografía del área.
 - El nivel de detalle y exactitud necesaria para el análisis.
 - La capacidad técnica del usuario para garantizar tal simulación del modelo.
 - Los recursos disponibles.
 - El detalle y la exactitud de la base de datos, es decir (inventarios de emisiones, datos meteorológicos y datos de la calidad del aire).

La información apropiada debe estar disponible antes de cualquier intento de aplicación de un modelo. Para un modelo que requiere detalle o exactitud, los datos de entrada deben ser existentes. Sin embargo, si se asume que los datos son adecuados, cuanto mayor es el detalle con que cuenta el modelo tales como las variaciones especiales y las condiciones meteorológicas, mayor es la credibilidad de evaluar el impacto de la fuente y de evaluar distintas estrategias de control.

2. Los modelos de la calidad del aire se han aplicado con mayor exactitud o con el menor grado de incertidumbre, a las simulaciones de promedios a largo plazo en áreas con topografía relativamente simple. Las áreas sujetas

a mayor influencia topográfica experimentan complejidades meteorológicas que son extremadamente difíciles de simular. Sin embargo los modelos están disponibles para tales circunstancias, estos son con frecuencia sitios específicos. En ausencia de un modelo capaz de simular tales complejidades, solamente una aproximación preliminar puede ser factible hasta que modelos y bases de datos mejores lleguen a estar disponibles.

3. Los modelos de simulación son herramientas altamente especializados. Personal competente y experimentado es un requisito esencial para lograr una aplicación adecuada de ellos. La necesidad de especialistas es crítica cuando se utilizan los modelos más sofisticados o el área investigada es complicada en cuanto a características meteorológicas o topográficas. Un modelo aplicado incorrectamente, o con datos inadecuados, puede conducir a juicios erróneos con respecto al impacto de la fuente o a la eficacia de una estrategia de control.
4. Los recursos demandados, generados por medio de modelos de la calidad del aire varían extensamente dependiendo del uso específico. Los recursos requeridos dependen de la naturaleza del modelo, su complejidad, detalle de la base de datos, la dificultad del uso, la cantidad y el nivel de maestría requeridos. Los costos de mano de obra y de instalaciones de cómputo pueden también ser factores importantes en la selección y el uso de un modelo para un análisis específico. Sin embargo, debe ser reconocido que bajo algunas circunstancias, y requisitos físicos de exactitud, ningún modelo actual puede ser apropiado al cien por ciento. Así que, la consideración de estos factores debe de conducir a la selección de un modelo más apropiado (Vicente, 2007).

6.3 Modelos de dispersión de calidad del aire

Los modelos de dispersión de calidad del aire consisten en un grupo de ecuaciones matemáticas que sirven para interpretar y predecir las concentraciones de contaminantes causadas por la dispersión y por el impacto de las plumas. Estos modelos incluyen los estimados de dispersión mencionados anteriormente y las diferentes condiciones meteorológicas, incluidos los factores relacionados con la temperatura, la velocidad del viento, la estabilidad y la topografía. Existen cuatro tipos genéricos de modelos: gaussiano, numérico, estadístico y físico. Los modelos gaussianos emplean la ecuación de distribución gaussiana y son ampliamente usados para estimar el impacto de contaminantes no reactivos. En el caso de fuentes de áreas urbanas que presentan contaminantes reactivos, los modelos numéricos son más recomendados que los gaussianos, pero requieren una información extremadamente detallada sobre la fuente y los contaminantes, y no se usan mucho. Los modelos estadísticos se emplean cuando la información científica sobre los procesos químicos y físicos de una fuente están incompletas o son vagas. Por último, están los modelos físicos, que requieren estudios de modelos del fluido o en túneles aerodinámicos del viento. La adopción de este enfoque implica la elaboración de modelos en escala y la observación del flujo en estos. Este tipo de modelos es muy complejo y requiere asesoría técnica de

expertos. Sin embargo, en el caso de áreas con terrenos complejos y condiciones de flujo también complejas, flujos descendentes de la chimenea y edificios altos, esta puede ser la mejor opción.

La selección de un modelo de calidad del aire depende del tipo de contaminantes emitidos, de la complejidad de la fuente y del tipo de topografía que rodea la instalación. Algunos contaminantes se forman a partir de la combinación de contaminantes precursores. Además, algunos contaminantes reaccionan fácilmente una vez que son emitidos a la atmósfera. Estas reacciones reducen las concentraciones y pueden ser necesario considerarlas en el modelo. La complejidad de la fuente también desempeña un papel de selección. Algunos contaminantes y pueden ser emitidos desde chimeneas bajas sujetas a flujos descendentes aerodinámicos. Si este es el caso, se debe de emplear un modelo que considere el fenómeno. En la dispersión de las plumas y los contaminantes. La topografía es un factor importante que debe ser considerado al seleccionar un modelo. Las plumas elevadas pueden tener un impacto en áreas de terrenos altos. Las alturas de este tipo de terrenos pueden experimentar mayores concentraciones de contaminantes debido a que se encuentran más cerca de la línea central de la pluma. En el caso que existan terrenos elevados, se debe de usar un modelo que considere este hecho (CEPIS. 2005)

6.3.1 Niveles de sofisticación de los modelos de dispersión

Existen dos niveles de sofisticación de modelos.

El primer nivel consiste en técnicas de estimación relativamente simples, para condiciones meteorológicas adversas, suministrando estimados en el impacto de la calidad del aire, de una fuente específica o diferentes tipos de fuentes. Estas técnicas son llamadas técnicas de barrido (screening) o modelos de barrido.

El segundo nivel consiste en técnicas que proveen mayor detalle de la química y física atmosférica, este requiere una vasta precisión en la alimentación de datos, proporcionando resultados más específicos del estimado de las concentraciones, así como del impacto de la fuente, para el diseño de estrategias de control. A estos modelos se les denomina modelos refinados.

6.3.2 Disponibilidad de los modelos

La guía para modelos de calidad del aire (Guideline on Air Quality Models) fue publicada por primera vez en abril de 1978 con el propósito de regular la aplicación de los modelos de calidad del aire en el estudio de concentraciones de contaminantes criterio. La continua investigación de esto responde a la necesidad de estudiar y resolver problemas cada vez más complejos de emisiones a la atmósfera. Por lo cual la guía pone a disposición la información de los modelos recomendados para estudios de calidad del aire.

La mayoría de la investigación de los modelos discutidos en la guía, los códigos, la documentación asociada y otra información útil están disponibles para la transferencia directa del centro de ayuda de EPA para regulación de los modelos de calidad del aire Support Center for Regulatory Air Modeling (SCRAM) en el sitio del web en internet es <http://www.epa.gov/scram001>. Éste es un sitio con el cual los modeladores deben familiarizarse (Hernández, 2007).

Existen en la actualidad varios modelos; no obstante sólo algunos están recomendados por la EPA. Muchos de estos modelos han sido sujetos a una evaluación de pruebas estadísticas (validación) de funcionamiento recomendadas por la Sociedad Meteorológica Americana y a revisiones científicas. Estos modelos se han seleccionado con base a los resultados de las evaluaciones anteriores, a su costo, a su relación con los programas de calidad del aire y a su disponibilidad.

A continuación se mencionan los modelos recomendados por la EPA:

- SCREEN
- BLP
- CALPUFF
- OCD
- CDMPLUS
- ISC3
- AERMOD

6.4 Selección de un modelo

La selección de un modelo de calidad del aire depende del tipo de contaminantes emitidos, de la complejidad de la fuente y del tipo de topografía que rodea la instalación.

7 DISEÑO TEÓRICO DE UN EQUIPO INCINERADOR.

El conocimiento de la composición, cantidad y propiedades fisico-químicas de los residuos a incinerar es una parte fundamental y necesaria para el correcto diseño del proceso. A partir de la caracterización es posible calcular la estequiometría de la combustión, la selección de la tecnología, tipo y capacidad del quemador, e incluso prever el sistema de depuración de gases (REPAMAR, 2006).

Los ensayos de caracterización incluyen análisis químicos, físicos y físico - químicos que determinan:

- Análisis elemental (C, H N, P, S, Inertes).
- Humedad
- Poder calorífico
- Materia orgánica.
- Incombustibles,

Estos procedimientos son fácilmente aplicables a sustancias comunes, sin embargo, dada la complejidad de los residuos hospitalarios, su grado de contaminación biológica y su heterogeneidad de componentes, hay que recurrir a métodos estandarizados (12) que se basan en la determinación de la cantidad de cada componente, es decir, la proporción de: papel, cartón, metal, vidrio, madera, plásticos, fluidos, huesos, tejidos, huesos y materia orgánica (REPAMAR, 2006).

Debido a que el exceso de aire en la alimentación al incinerador ocasiona la dilución de los gases, y en consecuencia, una contaminación simulada (es decir; una contaminación por debajo de la contaminación real), es indispensable corregir los resultados a un valor de referencia, pudiendo ser del 7, 8 u 11 por ciento en exceso de oxígeno a la salida del combustor. El valor de referencia escogido para dicha corrección depende exclusivamente de la normatividad ambiental sobre emisiones gaseosas vigente en cada país.

El origen de los metales pesados se debe a la composición de los residuos: presencia de metales, huesos, tapas de frascos, envases de aluminio para fármacos, residuos de quimioterapia, etc. Los metales pesados pueden formar parte de las cenizas volantes y de las escorias. En los gases de combustión se encuentran formando parte de las cenizas volantes, aunque también se encuentran depositados en las zonas frías (temperaturas < 300 °C) (REPAMAR, 2006).

La concentración y tipo de los metales pesados presentes en las emisiones gaseosas de un incinerador de residuos dependen de los siguientes factores:

- composición de los residuos a incinerar
- temperatura de la cámara primaria
- tiempo de residencia de los gases de combustión

- presencia de halógenos (cloro, bromo o yodo)

Por lo tanto, para minimizar la presencia de metales pesados en los humos de chimenea hay que evitar los excesos de aire (se debe reducir el arrastre y transporte neumático de las partículas de polvo, hollín y ceniza) y excesos de temperatura que potencian la volatilización de los metales pesados.

Para diferenciar las cenizas volantes (que se eliminan como hollín en los humos de combustión), con las que permanecen remanentes en la cámara de combustión, éstas últimas se denominarán escorias. De hecho, cuando la temperatura de la primera cámara es excesivamente alta ($>1000^{\circ}\text{C}$) los remanentes incombustibles (vidrio, metales, inertes) se funden para formar aglomerados vitrificados conocidos como escorias (REPAMAR, 2006).

A partir de la caracterización de los residuos, de la cantidad de diesel quemado y de la estequiometría de la combustión es posible predecir y calcular los siguientes aspectos:

- Composición de las emisiones gaseosas.
- Volumen de los gases generados.
- Tiempos de residencia.
- Velocidad de la corriente gaseosa en la chimenea.
- Temperatura de los gases y del incinerador.

7.1 Diseño del equipo

La caracterización de los desechos (cantidad generada, composición, humedad y PCIs) es fundamental para determinar la estequiometría de la combustión, y especialmente para el diseño del incinerador (REPAMAR, 2006).

En el diseño del incinerador intervienen varios aspectos como son: el tipo de tecnología (lecho fijo, parrillas móviles, fluidizado, etc.), tipo de combustible (diesel, gas), tipo de quemadores, sistema de control automático (temperatura, tiempos, concentración de CO y O_2), sistema de depuración de gases (líquido, semiseco y seco) y altura de la chimenea. La selección de cada uno de estos factores depende a su vez de los resultados que se obtengan de la caracterización del desecho, de la tecnología disponible en el mercado, del volumen de residuos, del tamaño del incinerador y de la ubicación geográfica (REPAMAR, 2006).

En la Tabla 7-1 se muestra una composición de residuos que son alimentados al incinerador. Esta composición es la que servirá de base de cálculo para el diseño del incinerador.

Tabla 7-1 Caracterización de los residuos cargados al incinerador

| Constituyente del residuo | Lb aire / Lb residuo | % Total | Aire Lb / h |
|---------------------------|----------------------|---------|-------------|
| Patológico | 1 | 5 | 60.6265 |
| Polietileno | 16 | 12.5 | 2425.06 |
| PVC | 8 | 3.5 | 339.5084 |
| Papel / Tela | 4 | 46.5 | 2255.3058 |
| Agua | 0 | 24 | 0 |
| Ceniza | 0 | 8.5 | 0 |
| TOTAL | | | 5080.5007 |

Fuente: TYSA, 2009

El diseño se realizará para un incinerador de doble cámara que opera con aire atemperado, se ha elegido este tipo de incinerador ya que es el más adecuado para el tratamiento de los RPBI y para garantizar el cumplimiento en la normatividad ambiental en caso de las emisiones a la atmosfera.

Basándose en la Tabla 7-1 se procedió a calcular los requerimientos estequiométricos de aire basados en una carga de 550 kg/h que es igual a 1212.53 Libras/h de residuos, requiriéndose 5080.5007 aire lb/h. La caracterización y cuantificación de residuos biológico infecciosos es muy variado, no hay un dato específico del mismos, por lo que se toma una base de cálculo en la cual se asume lo mostrado en la Tabla 7-1.

Se determinó realizar el diseño con una carga de 550 kg/h, debido a que el incinerador con el que se va a llevar a cabo las comparaciones en materia de emisiones atmosféricas, tiene una alimentación de 550 kg/h, por lo que se pretende obtener las mayores similitudes para poder llevar a cabo una simulación significativa.

7.1.1 Balance de masa

Es importante señalar que estos cálculos son el primer paso para el diseño de un incinerador, el balance de masa ofrece buenas estimaciones iniciales de los parámetros antes del proceso, durante el proceso y al final del mismo. Son estimaciones que se basan en la consideración de la corriente de gases de combustión que consiste de sólo dos componentes: la humedad y el gas seco. El componente de gas seco se considera que tiene las propiedades del aire seco. Se trata de entalpia y propiedades de saturación.

El balance de masas estima el consumo de aire y los productos de la combustión. Para proceder a calcular el balance se supone la siguiente información:

- Alimentación al incinerador 1,212.52 libras/h
- % de Mezcla 55 %

Diseño del flujo de aire

$$Q_{H_2O} = \text{carga [lb del residuo/h]} * [\text{lb agua/ lb residuo}]$$

$$Q_{H_2O} = 1212.53 \text{ lb del residuo/h} * 0.24 \text{ lb agua/ lb residuo}$$

$$Q_{H_2O} = 291 \text{ lb de agua/h}$$

$$Q_{H_2O} = 291 \text{ lb de agua/h} / 18 \text{ lb /lb mol}$$

$$Q_{H_2O} = 16.167 \text{ lb mol/h}$$

$$Q_{H_2O} = 104 \text{ pie}^3/\text{min}$$

Aire para la combustión del residuo

$$Q_w = \text{Total de requerimientos estequiometricos de aire} / 0.075 \text{ lb/pie}^3$$

$$Q_w = (1212.53 \text{ lb/h}) / (0.075 \text{ lb/pie}^3)$$

$$Q_w = 60843.6 \text{ pie}^3/\text{h}$$

$$Q_w = (60843.6 \text{ pie}^3/\text{h}) / (60 \text{ h/min})$$

$$Q_w = 1014.06 \text{ pie}^3/\text{min}$$

Aire para combustión del gas natural

Suposiciones: El poder calorífico del residuo sostiene las temperaturas después del arranque. Los requerimientos del gas serán aproximadamente el 10% del estimado de las instalaciones similares (9091 pie³/h) a 20% de exceso de aire.

$$Q_G = 9091 \text{ pie}^3/\text{h} \text{ (estimado de operaciones similares)}$$

$$Q_G = (9091 \text{ pie}^3/\text{h} * 12.43 \text{ pie}^3 \text{ aire/pie}^3 \text{ gas}) / 60 \text{ min/h}$$

$$Q_G = 1883 \text{ pie}^3 \text{ aire/min} (0.1)$$

$$Q_G = 188 \text{ pie}^3 / \text{min}$$

Flujo total de aire en la cámara primaria

$$Q_P = Q_{H_2O} + Q_w + Q_G$$

$$Q_P = 104 \text{ pie}^3/\text{min} + 1014.06 \text{ pie}^3/\text{min} + 188 \text{ pie}^3 / \text{min}$$

$$Q_P = 2320.46 \text{ pie}^3 / \text{min} \text{ a } 68^\circ\text{F}$$

Flujo de aire en la cámara secundaria

Consideraciones:

El quemador secundario opera al 10% de su capacidad, la capacidad del quemador es de $2 * 10^6$ Btu

$$Q_S = (2 * 10^6 \text{ Btu/ h} * 0.10) / 960 \text{ Btu/ pie}^3 \text{ gas}$$

$$Q_S = 208.33 \text{ pie}^3 \text{ gas/h}$$

$$Q_S = (208.33 \text{ pie}^3 \text{ gas/h} * 12.43 \text{ pie}^3 \text{ aire/ pie}^3 \text{ aire}) / 60 \text{ min/h}$$

$$Q_S = 43.16$$

$$Q_S = 86.32 \text{ a } 200\% \text{ de aire}$$

La operación de esta cámara se realiza con un 100% de exceso de aire para lograr una combustión completa de los componentes susceptibles en la mezcla gaseosa y partículas sólidas arrastradas. Los remanentes de la corriente gaseosa y partículas suspendidas serán capturados en el sistema de control de emisiones.

Requerimientos totales de aire del sistema

$$Q_t = Q_p + Q_s$$

$$Q_t = 2320.46 \text{ pie}^3 / \text{min a } 68^\circ\text{F} + 86.32 \text{ a } 200\% \text{ de aire}$$

$$Q_t = 2406.78 \text{ pie}^3 / \text{min a } 68^\circ\text{F}$$

Tamaños de las cámaras

Cámara primaria

$$\text{Tiempo de residencia} = 1 \text{ seg}$$

$$\text{PCMA} = 8886.32 \text{ a } 1562^\circ\text{F}$$

$$\text{Volumen} = \frac{8886.32 \text{ pie}^3 / \text{min} * 1 \text{ seg}}{60 \text{ seg/min}}$$

$$\text{Volumen} = 153.61 \text{ pies}^3$$

$$\text{Volumen} = 4.35 \text{ m}^3$$

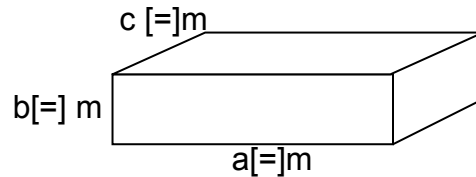
$$\text{Volumen} = a * b * c$$

$$\text{Volumen} = 4.35 \text{ m}^3$$

$$a = 3 \text{ m}$$

$$b = 1.5 \text{ m}$$

$$c = 0.966 \text{ m}$$



Dimensionamiento

Cámara secundaria

$$\text{Tiempo de residencia} = 2 \text{ seg}$$

$$\text{PCMA} = 9216.88 \text{ a } 1562^\circ\text{F}$$

$$\text{Volumen} = \frac{9216.88 \text{ pies}^3 / \text{min} * 2 \text{ seg}}{60 \text{ seg/min}}$$

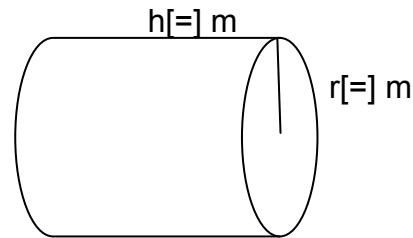
$$\text{Volumen} = 307.23 \text{ pies}^3$$

$$\text{Volumen} = 8.7 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen} = \pi r^2 h$$

$$h = 2.769 \text{ m}$$

$$r = 1 \text{ m}$$



Dimensionamiento

Capacidad del quemador

Los quemadores operan con gas L.P. y son del tipo aire atemperado.

Operada en posición de su mínima capacidad (relación 20:1)

$$\text{Quemador primario} = 1500000 \text{ Btu/h}$$

$$\text{Quemador secundario} = 2.5 * 10^6 \text{ Btu/h}$$

Capacidad de la cámara primaria

$$H = 1500000 \text{ Btu/h} / 959 \text{ Btu/pies}^3$$

$$H = 1564.13 \text{ pies}^3 / \text{h}$$

$$H = 156.41 \text{ pies}^3 / \text{h}$$

Calor total de entrada

Consideraciones: Las necesidades de gas serán 10% del estimado basado en el valor del poder calorífico del residuo.

Requerimientos de gas únicamente para arranque.

Calor del residuo = 1212.53 lbs/h * 3250 Btu/lb

Calor del residuo= 3940722.5 Btu/h

Gas = 156.41 pcs/h * 959 Btu/pie³ * 0.10

Gas = 150000 Btu/h

Total= 4090722.5 Btu/h

NOTA: Las unidades pcs es la abreviación de pies-cúbicos-estándar.

Pérdidas de calor

Almacenamiento, conducción y radiación

Considerando:

La pérdida de calor de estas fuentes serán de aproximadamente 20%

$H_{L1} = 0.2 * 4090722.5 \text{ Btu / h}$

$H_{L1} = 818144.55 \text{ Btu / h}$

Evaporación de la humedad contenida

$H_v = 1060 \text{ Btu / lb a } 60^\circ\text{F}$

$He1 = 0.24 * 1212.53 \text{ lb / h} * 1060 \text{ Btu / lb}$

$He1 = 308467.632 \text{ Btu / h}$

Evaporación de la humedad de la combustión del residuo

$He2 = 0.763 \text{ lb H}_2\text{O / lb de residuo} * 1212.53 \text{ lb / h} * 0.24 * 1040 \text{ Btu / lb}$

$He2 = 230920.033 \text{ Btu / lb}$

Evaporación de la humedad de la combustión de gas lp

$He3 = (0.099 \text{ lb H}_2\text{O / pcs}) * (1564.12 \text{ pcs / h}) * (0.10) * (1040 \text{ Btu / lb})$

$He3 = 16413.9729 \text{ Btu / h}$

Calor sensible en las cenizas

$HA = WA(C_p)(T_2 - T_1)$

Donde:

HA= Calor sensible de la ceniza (Btu / h)

WA= Peso de la ceniza (lb / h)

Cp= Calor específico promedio de la ceniza (Btu / lb - °F)

T2= Temperatura final (°F)

T1= Temperatura inicial (°F)

$HA = (0.085 * 992.07) * (0.217 \text{ Btu / lb}) * (1800 - 68)$

$HA = 31693.4024 \text{ Btu / lb}$

Pérdidas totales de calor

$$H_t = HL1 + HE1 + HE2 + HE3 + HA$$

$$H_t = 1405639.54 \text{ Btu / h}$$

Calor neto disponible

$$HN = (\text{calor total} - \text{pérdidas de calor})$$

$$HN = 4090722.5 - 1405639.54$$

$$HN = 2685082.96 \text{ Btu / h}$$

Productos de combustión

Residuos (Lbs producto / residuo)

$$\text{Residuos} = (1212.53 \text{ lb / h}) * ((100 - 24)/100) * (15.113)$$

$$\text{Residuos} = 13926.97 \text{ lb / h}$$

$$\text{Agua} = 1212.53 \text{ lb / h} * 0.24$$

$$\text{Agua} = 291.0072 \text{ lb / h}$$

$$\text{Gas LP} = (1564.129 \text{ pie}^3/\text{h}) * (0.98 \text{ lb / pcs}) * (0.10)$$

$$\text{Gas LP} = 153.28 \text{ lb / h}$$

$$\text{Peso total de productos} = 14371.27 \text{ lb / h}$$

Usos del agua en el proceso

Lavado del área de carga

Frecuencia: quincenal

Lavado: uso diario

Se supone 200gpd [=] galones/día

8.833 gph [=] galones / hora.

Lavado de transporte – cajas

Se supone 10 camiones / día

Frecuencia: diaria

Se supone 25 gal/caja

$$\text{Agua requerida} = (10 \text{ camiones / día} * 25 \text{ gal/caja})$$

$$\text{Agua requerida} = 250 \text{ gpd}$$

$$\text{Agua requerida} = (250 \text{ gpd} / 24)$$

$$\text{Agua requerida} = 10.416 \text{ gph}$$

Agua de apagado

Se supone 1.69 gpm [=] galones por minuto con sistema

$$\text{Uso de dos sistemas} = (1.69 * 2)$$

$$\text{Uso de dos sistemas} = 3.38 \text{ gpm}$$

$$\text{Uso de dos sistemas} = (3.38 \text{ gpm} * 60)$$

$$\text{Uso de dos sistemas} = 202.8 \text{ gph}$$

Lavador Venturi y Torre empacada (por sección)

Utilizan 46gpm

Utilizan 46 gpm * 60

Utilizan 2760 gph

Uso de dos sistemas= 2760 gph * 2

Uso de dos sistemas= 5520 gph

Requerimientos totales de agua

- | | |
|----------------------------------------|-----------------|
| 1. Lavado del área de carga | 8.333 gph |
| 2. Lavado de transportes – cajas | 10.416 gph |
| 3. Agua de apagado | 202.8 gph |
| 4. Lavador Venturi y Torre de empacado | 5520 gph |
| | 5741 gph |

Requerimiento total de agua: **95.692 gpm**

Se puede observar en la Tabla 7-2 un resumen sobre las especificaciones teóricas del equipo incinerador.

Tabla 7-2 Especificaciones teóricas del equipo

| Alimentación | 550 kg / h |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Vol. Cámara primaria | 8.39 m ³ |
| Vol. Cámara secundaria | 8.70 m ³ |
| Dimensiones de la cámara primaria | 4m * 2m * 1.05m |
| Dimensiones de la cámara secundaria | 3m * 1.5m * 0.96m rectangular r = 1.5, h= 1.19 cilíndrica |
| Flujo de aire de entrada | 2406.78279 pies ³ /min |
| Flujo de combustión | |
| Temp. Promedio cámara primaria | 850°C |
| Temp. Promedio cámara secundaria | 1000°C |
| Tiempo de residencia cámara primaria | 1seg |
| Tiempo de residencia cámara secundaria | 2seg |

7.2 Estimación de las emisiones a partir de factores de emisión

Para la parte de emisiones, éstas fueron calculadas a partir de los factores de emisión que se encuentran en el AP-42, sección 2-6, capítulo IV de la USEPA. A continuación se muestra la forma como se calcularon las emisiones provenientes de incineradores de residuos peligrosos biológicos infecciosos.

La capacidad de operación está dada en ton/h, por lo cual se requiere convertir 992.07 lb/h que es la carga que se le pretende suministrar al incinerador.

$$Carga = \left(\frac{(992.07 \text{ lb/h} * 1 \text{ kg} * 1 \text{ ton})}{(* 2.2046 \text{ lb} * 1000 \text{ kg})} \right) = 0.45 \text{ ton/H}$$

Una vez obtenida la carga se procede a localizar el factor de emisión deseado en el AP- 42, se debe de tomar en cuenta que para algunos contaminantes se encuentran diferentes valores dependiendo del sistema de control con que se cuente en la planta, o bien con el que se planea instalar. A partir de este dato, se selecciona el valor del factor de emisión, con el cual se van a calcular las emisiones.

Factor de emisión para el NO_x es de 3.56 lb/ton, en este caso el valor es el mismo para todos los casos, es decir no hay uno específico para algún sistema de control instalado.

$$Emisión = \text{Factor de emisión} * \text{Capacidad de operación}$$

$$Emisión = ((3.56) * (0.45 \text{ ton/h}))$$

$$Emisión = 1.602 \text{ lb/h}$$

Se realizó el mismo procedimiento para el cálculo de las estimaciones de emisión de los contaminantes que se encuentran normados en la NOM-098-SEMARNAT-2002. En la Tabla 7-3 se pueden observar el compendio de las emisiones estimadas para cada uno de los contaminantes provenientes de un incinerador de RPBI.

Tabla 7-3 Emisiones estimadas a partir de factores de emisión

| CONTAMINANTE | FACTOR DE EMISIÓN | EMISIÓN |
|-----------------|--------------------|----------------|
| Partículas | 0.175 lb/ton | 0.0788 lb/h |
| CO | 2.95 lb/ton | 1.328 lb/h |
| HCl | 5.65 lb/ton | 2.543 lb/h |
| NO _x | 3.56 lb/ton | 1.602 lb/h |
| SO ₂ | 0.845 lb/ton | 0.380 lb/h |
| As | .000000395 lb/ton | 1.778E-08 lb/h |
| Ni | 0.000328 lb/ton | 1.476E-04 lb/h |
| Mn | .000466 lb/ton | 2.097E-04 lb/h |
| Cd | .000178 lb/ton | 8.01E-05 lb/h |
| Pb | .0000992 lb/ton | 4.464E-05 lb/h |
| Cr | .00000215 lb/ton | 9.675E-07 lb/h |
| Hg | 0.0155 lb/ton | 6.975E-03 lb/h |
| TCDD | 0.000000123 lb/ton | 5.535E-08 lb/h |
| TCDF | 0.0000028 lb/ton | 1.26E-06 lb/h |

Una vez obtenidas las estimaciones se procedió a calcular las concentraciones de cada una de las emisiones. Para calcular las concentraciones se utilizó la siguiente fórmula.

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Emisión}}{\text{Gasto}}$$

$$\text{Concentración [=]} \frac{g}{m^3}$$

Para llevar a cabo las estimaciones de las emisiones de HCl, NO_x, SO₂, partículas, As, Se, Co, Ni, Mn, Sn, Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, Hg, dioxinas y furanos, se procedió a realizarlas de la misma manera que el CO, salvo que para cada uno de los casos se observó en las tablas antes mencionadas del AP – 42 el factor de emisión correspondiente.

Para poder comparar las emisiones estimadas, se debe de calcular las concentraciones para cada uno de los contaminantes encontrados en la NOM-098-SEMARNAT-2002. Una vez obtenidas las concentraciones, se procede a compararlas con los límites máximos permisibles que se encuentran en la norma. Se puede observar el resumen de las emisiones estimadas en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4 Estimación de emisiones basadas en factores de emisión

| Parámetro | Emisión teórica mg / m ³ | LMP mg / m ³ |
|-----------------|----------------------------------------|----------------------------|
| PST | 0.109 | 50 |
| CO | 19.115 | 63 |
| SO ₂ | 29.469 | 80 |
| HCl | 15.622 | 15 |
| NO _x | 95.894 | 300 |
| MM1 | 0.605 | 0.7 |
| MM2 | 0.018 | 0.7 |
| Cd | 0.001 | 0.07 |
| Hg | 2.81*10 ⁻⁵ | 0.07 |
| Dioxinas | 5.256E-06 | 0.2 |
| Furanos | 2.007E-05 | 0.2 |

Se debe de tomar en cuenta que al emplear los factores de emisión, las emisiones obtenidas son estimaciones, la única forma de obtener datos exactos y precisos para el diseño y compra de equipos de control es contando con un monitoreo en la fuente, en este caso en la chimenea del incinerador.

7.3 Sistema de control de emisiones

Wayne (1996). Menciona que Brinckman categorizó los contaminantes provenientes de la incineración de residuos peligrosos biológicos infecciosos en tres grupos:

- Aquellos que pueden ser controlados por el proceso de combustión (ej. monóxido de carbono, hidrocarburos y constituyentes orgánicos);
- Partículas, que incluye metales pesados, posiblemente dioxinas y furanos, y cenizas arrastradas; y
- Gases ácidos (ej. ácido clorhídrico y SO_2 y SO_3).

El control de las emisiones provenientes de los incineradores de residuos peligrosos biológicos infecciosos requiere atención en tres periodos del proceso:

- I. Precombustión (sistema de flujo de los residuos)
- II. Combustión (facilidad de operación y mantenimiento), y
- III. Postcombustión (equipo de control de emisiones)

En base a la literatura y a los equipos incineradores que se encuentran operando en México, se eligió un sistema de control que cuente con un equipo para la remoción de las partículas y un equipo que remueva los gases ácidos. Se decidió contar con un equipo que utiliza el método de remoción seca de partículas, en particular filtros. Los filtros son los más usados debido a las eficiencias que tienen en la remoción de partículas.

Para la remoción de los gases ácidos, se optó por utilizar un sistema de remoción en seco, en el caso particular de un inyector seco con cal. El sistema de control seleccionado, solamente produce residuos secos, por lo cual no se tendrá problemas con generación de aguas residuales dentro del sistema de control.

A continuación se detallan el funcionamiento del sistema de control. Los gases de la cámara primaria pasarán al sistema de control de emisiones, donde mediante un colector de bolsas se retendrán las partículas gruesas (son aquellas que tienen un diámetro entre 2.5 – 10 μm) y mediante un sistema de lavado de gases se logrará bajar a temperatura de ellos y por otro atrapar las partículas finas (partículas con diámetro de 2.5 μm) y neutralizará la corriente de salida de los gases mismos que salen por la chimeneas.

Posteriormente las emisiones son conducidas a un captador de polvos para asegurar que las emisiones no excedan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-098-SEMARNAT-2002.

Cabe mencionar que los datos correspondientes a las emisiones teóricas son sin previo tratamiento; es decir que aún no son sometidos al tren de tratamiento de los gases.

7.4 Estimación de la dispersión de los contaminantes a partir de un modelo.

Como se menciona en el capítulo 6, existen diferentes tipos de modelos, lo más idóneo es emplear un modelo de dispersión de calidad del aire. Para poder decidir qué tipo de modelo de dispersión se debe de emplear, se debe de tomar en cuenta la información: topográfica, meteorológica, tipo de contaminantes emitidos, la complejidad de la fuente, con la que se cuente. Mientras que se cuente con mayor información, el modelo de dispersión a utilizar será más sofisticado y detallado. Cada modelo existente requiere diferente información con la cual se debe de alimentar para correr el modelo.

Para utilizar un modelo de dispersión se debe de ingresar los datos obtenidos en un muestreo pertinente y el programa muestra los resultados requeridos. Por ende, la exactitud de la proyección dependerá de cómo se hayan tomado los datos y el correcto ingreso de los mismos al programa de modelación.

Para hacer sus estimaciones los modelos incorporan gran cantidad de formulas matemáticas, basadas en fundamentos teóricos acerca del comportamiento de los contaminantes, y su interacción con el ambiente. Por lo que no basta con conocer el funcionamiento del modelo, sino que hay que familiarizarse con los conceptos teóricos que fundamentan las variables; para comprender, por ejemplo, el comportamiento de una pluma de emisión en una atmósfera estable o inestable.

Por lo tanto, la elección del modelo de dispersión adecuado requerirá de buen criterio y conocimiento de los conceptos teóricos que fundamentan los algoritmos componentes del modelo, por parte de los encargados del monitoreo ambiental.

Para poder emplear de manera efectiva y confiable un modelo de dispersión se menciona al inicio de este tema que se requiere cierta información. Se había desarrollado esa parte para emplear el modelo SCRI, sin embargo todos los datos recopilados era para una empresa que se encuentra en Celaya, Gto; no obstante se decidió cambiar de empresa para el caso de estudio ya que con la que se contaba, estaba realizando cambios en el equipo incinerador y por cuestiones de tiempo no se podía esperar a que este arrancara. Por lo que se consiguió la autorización de la empresa Techno Ambiental ubicada en Lerma; sin embargo por cuestiones de tiempo no se pudo recopilar toda la información que se requiere para poder correr un modelo de manera correcta y confiable.

No obstante a continuación se detalla la manera en que se debe de emplear un modelo, así como la información que se requiere para alimentarlo, y de esta manera ejecutarlo (correr) adecuadamente. Se sugiere utilizar el modelo CALPUFF, éste modelo es multi – etapa, multi – especie, de estado no estacionario, que simula los efectos en el tiempo y espacio de la variación de las condiciones meteorológicas, transporte, transformación y remoción de contaminantes.

CALPUFF se diseñó para su uso en distancias desde 10 metros hasta cientos de kilómetros de la fuente. Incluye los algoritmos para los efectos de campo cercanos, tales como: cavitación (downwash), transición boyante y momentum de la taza de la pluma, penetración parcial de la pluma, tamaño de la malla, los efectos por las interacciones costeras y lo accidentado del terreno; así como una gama de efectos más amplia, tales como, la remoción del contaminante debido al barrido por humedad, deposición seca, transformación química, cizalla vertical del viento horizontal, transporte sobre el agua, fumigación de la pluma, y los efectos de la visibilidad en las concentraciones de partículas (Hernández, 2007).

CALPUFF es apropiado para los siguientes usos:

- Transporte a largas distancias (distancias fuente – receptor de 50 a cientos de kilómetros) de emisiones provenientes de fuentes a punto, de área, de línea y de volumen.
- Los datos meteorológicos de entrada se deben caracterizar completamente con la variación en el tiempo
- El propósito de elegir un sistema que se modele con CALPUFF es tratar completamente el estancamiento, cambios del viento, variaciones de tiempo y del espacio así como los efectos de la meteorología sobre el transporte y la dispersión.

El sistema de modelo CALPUFF está constituido por tres componentes principales: CALMET, CALPUFF y CALPOST

Para poder correr el modelo, se debe de alimentar la información que se presenta en la Tabla 7-5.

Para los datos meteorológicos se pueden utilizar diversas formas de entradas de datos en el CALPUFF:

- I. Los datos meteorológicos necesarios para que el modelo CALPUFF funcione, son datos generados en forma tridimensional con procesador CALMET. Las entradas en CALMET incluyen las observaciones superficiales, la velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, nubosidad, altura de capa de mezcla, humedad relativa, la presión superficial, y precipitación (tipo y cantidad), y los datos en la capa superior (velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y altura).
- II. Una sola estación en la superficie genera los datos meteorológicos de la capa superior y con el procesador CTDMPPLUS se ajusta el formato adecuado para altura y superficie (SURFACE.DAT y PROFILE.DAT). Esto permite una variación vertical en los parámetros meteorológicos pero ninguna variabilidad espacial.
- III. Los datos meteorológicos de una sola estación se ajustan a un archivo con formato para aplicarse en ISCST3. Esta opción no explica la variabilidad de los parámetros meteorológicos en el eje horizontal vertical, a menos que en

la manera prevista para el uso de los exponentes estabilidad – dependientes del viento y de los promedios de la temperatura.

Los datos de la malla del terreno y del suelo se requieren como entrada para CALMET cuando se utiliza la opción I. Los programas geofísicos del procesador son a condición del sistema que modela, la base de datos estándar del terreno y es proporcionada por la U.S. Geological Survey (USGS).

Tabla 7-5 Datos de la fuente

| DATOS DE LA FUENTE | | | |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| DE PUNTO | DE ÁREA | DEL VOLUMEN | DE LÍNEA |
| Localización de la fuente (m) | Localización y forma de la fuente | Localización y forma de la fuente | Localización y forma de la fuente |
| Altura de la chimenea (m) | Altura de lanzamiento (m) | Altura de lanzamiento (m) | Altura de lanzamiento (m) |
| Diámetro de la chimenea (m) | Elevación desde la base (m) | Elevación desde la base (m) | Elevación desde la base (m) |
| Velocidad de salida del gas (m/s) | Distribución vertical inicial (σ_z) | Distribuciones horizontales y verticales (σ_y, σ_z) | Parámetro medio de la flotabilidad |
| Temperatura de salida del gas (K) | Emisión para cada contaminante (g/s) | Emisión para cada contaminante (g/s) | Emisión para cada contaminante (g/s) |
| Elevación de la base (m) | | | |
| Dimensiones específicas del edificio y la dirección del viento | | | |
| Emisión para cada contaminante | | | |

En la Tabla 7-6 se muestran los datos de salida del modelo; es decir la información que arroja el sistema una vez que se utiliza o bien se corre.

Tabla 7-6 Datos de salida del modelo

| DATOS DE SALIDA |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Muestra archivos de concentraciones para cada hora de cada especie modelada |
| Deposición húmeda |
| Deposición seca |
| Aplicaciones de la visibilidad |
| Coefficientes de extinción |
| Los procesadores (PRTMET y CALPOST) proporcionan opciones para el análisis y la presentación de los resultados modelados. |

CALPUFF puede ser usado para contaminantes gaseosos, así como para partículas inertes o que presentan reacción química, como son, SO₂, SO₄, NO, NO₂, HNO₃, NH₃, PM – 10 y contaminantes tóxicos.

Debido a que CALPUFF no contiene ninguna limitación es el número de fuentes o receptores, es ampliamente recomendado aplicarlo en el caso de una planta incineradora de RPBI ya que el número de receptores varían de acuerdo a la ubicación de la misma, por lo general son varios centros poblacionales, por lo que se requiere de un modelo como éste para poder arrojar datos confiables sobre la dispersión de los contaminantes, así como las concentraciones máximas reportadas en cada uno de los receptores.

7.5 Caso de estudio

7.5.1 Descripción de la Planta Incineradora a Estudiar

7.5.2 Ubicación

La empresa Corporativo Techno Ambiente, S.A. de C.V., se localiza en el municipio de Lerma, que limita al norte con los municipios de Jilotzingo y Xonacatlán, al sur con Capulhuac y Tianguistengo, al oriente con Huixquilucan, Naucalpan de Juárez y Ocoyoacac, y al poniente con Metepec, San Mateo Atenco y Toluca, tal como se muestra en la Figura 7-1 se presenta la localización regional de la empresa. Sus coordenadas geográficas son: Latitud Norte 19°17', Longitud Oeste 99°31', Altitud 2240 msnm (metros sobre el nivel del mar).



Figura 7-1 Localización de la empresa Techno Ambiente S.A. de C.V.

El Corporativo Techno Ambiente S.A. de C.V. su ubicación específica es en Circuito de la Industria Oriente 42 Manzana 1 Lote 1 s/n, Parque Industrial Lerma, Municipio de Lerma, Estado de México. El corporativo cuenta con una capacidad instalada de 4818 ton/año.

Corporativo Techno Ambiental, S.A. de C.V., se encuentra rodeada por otras empresas, ya que su ubicación es dentro de un parque industrial, donde la localidad más cercana se encuentra aproximadamente a 3 km al norte siendo la unidad habitacional. En un radio de 1000 m del entorno inmediato del predio en donde se localiza la empresa. Se pueden observar las colindancias en la Figura 7-2.

Las colindancias inmediatas del predio que ocupa la empresa son las siguientes:

- Al norte 41.07 m, con basurero municipal
- Al sur 40.97 m, con terreno baldío
- Al este 35.19 m, con canal
- Al oeste 31.93 m, con el circuito de la industria oriente y En frente ACCO Mexicana.



Figura 7-2 Colindancias de la empresa Techno

Fuera del perímetro de 1000 m. al noroeste aproximadamente a 5.4 km se localiza El Aeropuerto Internacional Adolfo López Mateos; al suroeste a 12.77 km se localiza la capital de Toluca, y al Sur a 3.81 km. la población de San Mateo.

La temperatura promedio en la cabecera municipal es de 19 grados centígrados. En las zonas altas de 15 grados centígrados. La temperatura media anual es de 12.4 grados centígrados; la precipitación es de 822.5 milímetros. La pluviosidad promedio es de 1,075 milímetros. En promedio: 154 días lluviosos y 211 soleados. Los vientos más notables se presentan en los meses de febrero y marzo. Los vientos dominantes son de sur a norte (INAFED, 2005).

La planta incineradora se encuentra ubicada en la Av. de la Industria Oriente No. 42 Mz. 1 Lt. 1 Parque Industrial Lerma, Lerma Estado de México. Se puede observar en la Figura 7-3 que sus colindancias son con parques industriales y zonas de cultivo.



Figura 7-3 Localización de la planta incineradora

Es importante conocer sus colindancias ya que para aplicar el modelo de dispersión se determina hacia donde se van las emisiones provenientes del incinerador, así como el grado de afectación, siempre y cuando, se cuente con la información adecuada de emisiones, meteorología, topografía y uso de suelo; etc.

En la Figura 7-4 se observan las instalaciones con las que cuenta la planta incineradora de RPBI y medicamentos caducos.



Figura 7-4 Empresa incineradora

La empresa cuenta con una capacidad de tratamiento de residuos peligrosos biológico infecciosos por esterilización (Capacidad Instalada de 32850 ton/año). Para el tratamiento de residuos biológico infecciosos de tipo patológico y medicamento caduco por Incineración (Capacidad Instalada de 4818 ton/año).

En Junio del 2008 se presentó el Estudio de Riesgo Nivel II por parte de la empresa, éste fue realizado por Tecnología Ambiental y Servicios Integrales, S.A. de C.V. Una vez que fue autorizado el proyecto por parte de la SEMARNAT, la empresa obtuvo su Licencia Ambiental Única (LAU).

7.5.3 Descripción del equipo

El equipo incinerador consta de doble cámara con aire atemperado, para garantizar el cumplimiento de la calidad de las emisiones.

El incinerador opera en forma automática tanto los sistemas auxiliares para el control ambiental como el suministro de combustible a los quemadores, los quemadores de la cámara primaria inducen la suspensión del residuo lo que permite que se minimice la generación de cenizas y por lo tanto que de manera esporádica se lleve a cabo la remoción de las cenizas.

El diagrama del procedimiento operativo del incinerador se muestra en la Figura 7-5.

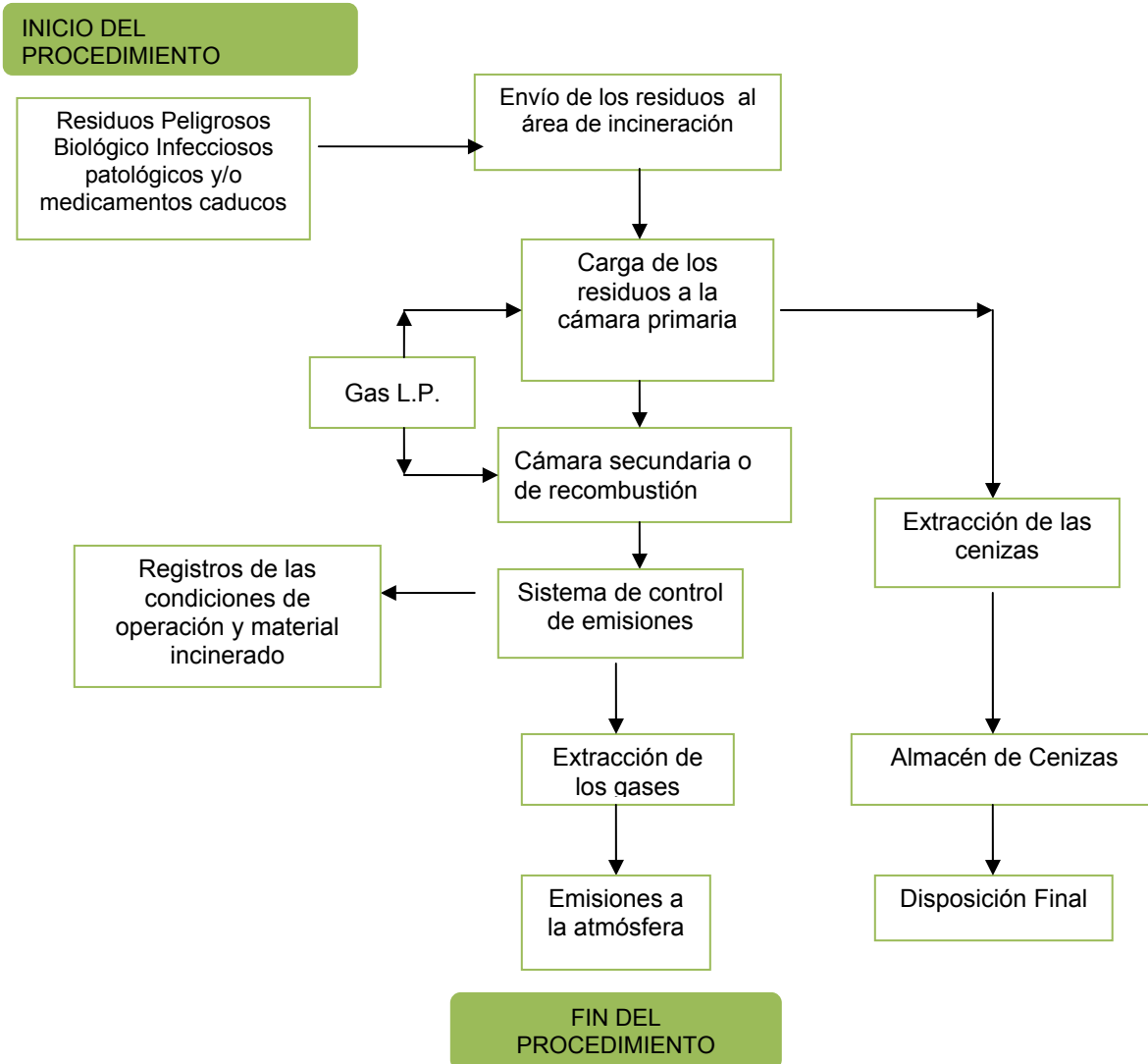


Figura 7-5 Diagrama de Flujo del proceso de tratamiento de RPBI

La operación del incinerador se basa en el control directo de las variables de proceso, controladas mediante instrumentos de respuesta rápida, capaces de compensar las variaciones en las cargas, que permite regular en forma automática la dosificación del combustible y aire de alimentación, mediante el sistema denominado de “aire controlado “

La alimentación al incinerador se realiza con un alimentador automático; es decir el residuo se coloca en el alimentador, mismo que cuenta con los dispositivos de seguridad para evitar el retroceso de humo, esto es, el residuo se carga en la cámara de alimentación (aproximadamente de 100 a 150 kg) se cierra la puerta y el permiso permitirá que se desplace el pistón y la placa empuje el material cuando se ha alcanzado la puerta de alimentación, se abrirá la compuerta de guillotina que alimenta al incinerador, con ello se logra el sello para evitar la pérdida de calor y vacío del sistema de incineración.

Si se apaga la cámara primaria y puede provocar que la chimenea produzca humo. Cada vez que la cámara primaria se apaga por cualquier razón, se reinicia el ciclo de incineración. Terminado el ciclo se alimenta del mismo modo la siguiente carga, se esperan de 6 a 7 cargas por hora.

Una vez que es alimentado el incinerador, los residuos son trasladados a la cámara primaria, en este proceso, los componentes volátiles se convierten en gas y se transfieren a la cámara secundaria o de re-combustión. Las temperaturas de operación de la cámara primaria son entre 800 y 900°C.

Los gases de combustión son canalizados al sistema de control de emisiones que aseguran capturar las emisiones generadas en su máxima proporción y lograr un enfriamiento súbito de las emisiones de la cámara secundaria (TYSA, 2009b).

El gas volátil de la cámara primaria es transferido por el tiro del ventilador secundario a la cámara secundaria. El cual opera con quemadores que con un exceso controlado de aire se logra la destrucción de los compuestos volátiles presentes en la corriente. Las temperaturas de operación de la cámara secundaria son 800 a 1100 °C.

La operación de esta cámara se realiza con un 100% de exceso de aire para lograr una combustión completa de los componentes susceptibles en la mezcla gaseosa y partículas sólidas arrastradas. Los remanentes de la corriente gaseosa y partículas suspendidas serán capturados en el sistema de control de emisiones (TYSA, 2009b).

Ya que es un laboratorio acreditado en la rama de fuentes fijas, la información que se presenta en la Tabla 7-7 y

Tabla 7-8 fueron obtenidas a partir de la realización del muestreo en fuente y bajo las normas:

- NMX-AA-009-SCFI-1993
- NMX-AA-010-SCF1-2001
- US EPA Test Method 3A Jun 1990
- NMX-AA-114-1991
- US EPA Test Method 7E Ago 1990
- NMX-AA-054-1978
- NMX-AA-056-1980
- NMX-AA-070-1980
- US EPA Test Method 18 Feb 2000

A continuación se presentan las emisiones al 85 y 100% de capacidad del sistema de tratamiento obtenidas del incinerador Techno Ambianta, los datos que se presentan fueron obtenidos por Tecnología Ambiental y Servicios Integrales, S.A. de C.V., poseen el número de registro NÚMQRO/MEX/DF/REDLA048/AEA/2009, cuentan con acreditaciones en la ambiente laboral, fuentes fijas y residuos.

Para la obtención de las emisiones al 85% de capacidad del sistema de tratamiento, se llevó a cabo un muestreo el cual fue realizado por el Ing. Raúl Martínez. Las fechas de realización del muestreo fueron los días 26 y 27 de Febrero del 2009, con un número de control M-09509/39445-39450.

En la Tabla 7-7 se muestran las emisiones reales provenientes del equipo trabajando al 85% de su capacidad.

Tabla 7-7 Emisiones al 85% de capacidad del sistema de tratamiento

| Parámetro | Concentración ¹ corregida mg / m ³ | Nivel máxima de Emisión ² mg / m ³ |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Partículas suspendidas totales, PST | 33.360 | 50.00 |
| Monóxido de carbono, CO | 19.317 | 63.00 |
| Bióxido de azufre, SO ₂ | 26.553 | 80.00 |
| Ácido clorhídrico, HCl | 8.740 | 15.00 |
| Óxidos de nitrógeno, NO _x | 120.163 | 300.00 |
| Plomo+ Cromo total+ Cobre+ Zinc, Pb+ Cr+ Cu+ Zn (MM1) | 0.436 | 0.70 |
| Arsénico+ Cobalto+ Selenio+ Níquel+ Manganeso+ Estaño, Ar+ Co+ Se+ Ni+ Mn+ Sn (MM2) | 0.112 | 0.70 |
| Cadmio, Cd | 0.002 | 0.070 |
| Mercurio, Hg | 0.0002 | 0.070 |
| Dioxinas y Furanos ⁽³⁾ | 0.119 ng/m ³ | 0.20 |
| Eficiencia de combustión ⁽⁴⁾ | 99.9693 | |
| Eficiencia de destrucción-remoción, DER ⁽⁵⁾ | 99.99506 | |

Fuente: TYSA, 2009b

NOTAS:

- 1.-Concentración de contaminantes al 7% de oxígeno, base seca, y condiciones estándar de presión y temperatura (25°C y 1 atm).
- 2.-Nivel máximo establecido en el protocolo de pruebas del incinerador.
- 3.-Las dioxinas y furanos están dados en ng/m³.

$$4.- \%EC = \frac{ppm_{CO_2} * PM_{CO_2}}{ppm_{CO_2} * PM_{CO_2} + ppm_{CO} * PM_{CO}} * 100$$

$$5.- DER = \frac{A_i - E_f}{A_i} * 100$$

Para la obtención de las emisiones al 100% de capacidad del sistema de tratamiento, también se realizó un muestreo realizado por el Ing. Raúl Martínez los días 24 y 25 de Febrero del 2009. Este muestreo tiene un número de control M-09509/39445-39450.

De la misma manera se muestran en la Tabla 7-8 las emisiones al 100% de la capacidad del sistema.

Tabla 7-8 Emisiones al 100% de capacidad del sistema de tratamiento

| Parámetro | Concentración¹ corregida mg / m³ | Nivel máxima de Emisión² mg / m³ |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Partículas suspendidas totales, PST | 23.727 | 50.00 |
| Monóxido de carbono, CO | 45.076 | 63.00 |
| Bióxido de azufre, SO ₂ | 18.197 | 80.00 |
| Ácido clorhídrico, HCl | 4.290 | 15.00 |
| Óxidos de nitrógeno, NO _x | 115.329 | 300.00 |
| Plomo+ Cromo total+ Cobre+ Zinc, Pb+ Cr+ Cu+ Zn (MM1) | 0.1652 | 0.70 |
| Arsénico+ Cobalto+ Selenio+ Níquel+ Manganeso+ Estaño, Ar+ Co+ Se+ Ni+ Mn+ Sn (MM2) | 0.079 | 0.70 |
| Cadmio, Cd | 0.003 | 0.070 |
| Mercurio, Hg | 0.0001 | 0.070 |
| Dioxinas y Furanos ⁽³⁾ | 0.176 | 0.20 |
| Eficiencia de combustión ⁽⁴⁾ | 99.9428 | |
| Eficiencia de destrucción-remoción, DER ⁽⁵⁾ | 99.99056 | |

Fuente: TYSA, 2009b

NOTAS:

- 1.-Concentración de contaminante al 7% de oxígeno, base seca, y condiciones estándar de presión y temperatura (25 °C y 1 atm).
- 2.-Nivel máximo establecido en el protocolo de pruebas del incinerador.
- 3.-Las dioxinas y furanos están dados en ng/m³.

$$4.- \%EC = \frac{ppm_{CO_2} * PM_{CO_2}}{ppm_{CO_2} * PM_{CO_2} + ppm_{CO} * PM_{CO}} * 100$$

$$5.- DER = \frac{A_i - E_f}{A_i} * 100$$

7.6 Comparativo de emisiones teóricas y reales de los sistemas

En la Tabla 7-9 se observan las emisiones calculadas de manera teórica para un incinerador cuya alimentación es 550 kg, con las emisiones calculadas a partir del muestreo real en el incinerador con la misma alimentación.

Tabla 7-9 Emisiones teóricas, físicas y límites máximos permisibles

| Parámetro | Emisión teórica mg / m ³ | Emisión real mg / m ³ | LMP mg / m ³ |
|-----------------|----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Partículas | 0.109 | 23.727 | 50 |
| CO | 19.115 | 45.076 | 63 |
| SO ₂ | 29.469 | 18.197 | 80 |
| HCl | 15.622 | 4.290 | 15 |
| NOx | 95.894 | 115.329 | 300 |
| MM1 | 0.605 | 0.1652 | 0.7 |
| MM2 | 0.018 | 0.079 | 0.7 |
| Cd | 0.001 | 0.003 | 0.07 |
| Hg | 2.81*10 ⁻⁵ | 0.0001 | 0.07 |
| Dioxinas | 5.256E-06 | 0.176 | 0.2 |
| Furanos | 2.007E-05 | 0.176 | 0.2 |

Los valores de las emisiones teóricas y las reales se encuentran por debajo de los LMP que establece la NOM-098-SEMARNAT-2002. La diferencia que existe entre los valores estimados de manera teórica con los valores obtenidos a partir de un muestreo, son significativos. Estas diferencias se deben a que lo obtenido de manera teórica es basado en estimaciones a partir de factores de emisión, y en estos casos no se están considerando fallas en el proceso, diferencias de operación, así como errores humanos. No obstante nos da una idea de las emisiones que se pueden generar en una empresa; sin embargo lo ideal es que se realicen los muestreos adecuados para la realización de los cálculos de generación, de manera que se tengan las emisiones reales y éstas puedan compararse con los LMP establecidos en la norma.

8 CONCLUSIONES

- México cuenta con una infraestructura de 42 empresas incineradoras de residuos biológicos infecciosos. El tipo de incinerador principalmente empleado es el de doble cámara de combustión (superior al 80%), debido a que con éste tipo de equipo se obtiene mayor rendimiento que con el rotatorio y el de aire controlado, así como un mejor control en las emisiones.
- La legislación en el ámbito internacional para la incineración de residuos peligrosos es muy variada, en su mayoría cada una depende de la tecnología con la que se encuentra en cada país y a partir de esta se determinan las especificaciones de manejo, así como los límites de las emisiones de contaminantes. No obstante en la mayoría de los países Latinoamericanos la legislación existente son traducciones de legislaciones que existen en países de primer mundo, aún y cuando en los países de Latinoamérica no se cuenta con la infraestructura que cuentan los grandes países, por lo general resulta que la legislación es muy difícil de cumplir por los altos niveles de cumplimiento. En México existe la NOM-098-SEMARNAT-2002, la cual establece las especificaciones de operación de la incineración de residuos así como los límites de emisión de los contaminantes.
- Los sistemas de control de emisión más apropiado para lograr emisiones por debajo de los límites máximos permisibles según la normatividad aplicable son los lavadores Venturi y los captadores de polvos.
- Se obtuvo el diseño del incinerador, de manera que el equipo utilizado es un incinerador de doble cámara de combustión; se eligió este equipo ya que es el equipo más óptimo para la incineración de RPBI.
- Las emisiones teóricas obtenidas fueron comparadas con las emisiones reales, destacando que las teóricas están por debajo de las reales, la razón de esto es que son cálculos ideales y no cuentan con errores de operación ni problemas del sistema.
- Los efectos a la salud que pueden ocasionar los contaminantes provenientes de incineradoras de RPBI se presentan de manera crónica, por lo que se puede decir que la principal afectación es en las vías respiratorias de manera de efectos agudos. Los efectos hacia el medio ambiente se pueden observar en los sedimentos del suelo, así como la acumulación de los contaminantes puede ser observada en los organismos vivos, ya que la mayoría de los contaminantes son lipofílicos y bioacumulables, por lo que los efectos no sólo quedan en los organismos sino que siguen la cadena alimenticia.

9 RECOMENDACIONES

- Se recomienda llevar a cabo prácticas de pre-combustión de los RPBI. De esta manera se pueden controlar las emisiones de forma que se puede identificar la fuente de las sustancias tóxicas en el flujo de los residuos y de esta manera se pueden remover del flujo antes de ser incinerados, minimizando los contaminantes en los residuos antes de ser incinerados tendrán el efecto de reducir las emisiones tóxicas.
- Se exhorta a que se realicen prácticas de operación de la combustión ya que éstas tienen un efecto directo con las emisiones, conociéndose que la eficiencia de la combustión es influenciada por la temperatura, tiempo de residencia y la relación aire – combustible.
- Se debe de contar con sistemas de control de las emisiones para minimizar el impacto hacia la salud y el medio ambiente. Los lavadores de gases, así como los captadores de polvo, son capaces de lograr una tasa de eliminación de contaminantes considerablemente alta.
- Se propone utilizar otra forma de diseño de un equipo incinerador, de manera que pueda ser comparado con el diseñado en este trabajo.
- Se recomienda realizar la evaluación del impacto en la calidad del aire mediante la aplicación correcta de un modelo de dispersión que considere información meteorológica tanto en la superficie como en la vertical en la zona de estudio, además de las emisiones a la atmósfera y su variación durante el periodo de estudio, entre otros aspectos.
- Se sugiere abarcar el tema de efectos hacia la salud y el medio ambiente, ya que este tema es muy extenso, puede ser retomado para otro tema de investigación.
- La infraestructura existente en México en cuanto a tecnologías de tratamiento de RPBI es amplia, sin embargo la mayoría de las empresas incineradoras se encuentran concentradas en el centro del país, por lo que hace falta alguna tecnología de tratamiento de estos residuos en cada uno de los estados de México.

10 REFERENCIAS

Alvarado V, Fiedler H, Gutiérrez V. (2005) The Mexican experience in the elaboration of release inventories of PCDD/PCDF. Presented at the 25th International Symposium on Halogenated Environmental Organic Pollutants and Persistent Organic Pollutants (POPs), Toronto, Canada, 21-26 August 2005. CD ID 1848. pp. 5 -10.

Beltrán I. (2006) Análisis de la Generación y Control de Emisiones de Dioxinas y Furanos. Tesis de Licenciatura en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, México. pp. 40 – 54.

Brunner C. (1993) Hazardous Waste Incineration. McGraw-Hill. 2nd edition. MacGraw-Hill. USA. pp. 309 – 362, 460.

Cárdenas B. (2007) Experiencias en México sobre inventarios de dioxinas y furanos. Taller sobre reducción de emisiones de dioxinas, furanos y hexaclorobenceno con enfoque en sectores industriales en México Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte Monterrey, Nuevo León 31 de enero 2007. pp. 2 – 5.

Carpi A. (1997) Mercury from combustion sources: a review of the chemical species emitted and their transport in the atmosphere. *Water, Air, and Soil Pollution* 98: pp. 241- 254.

Castañeda L, Jiménez J, Urzúa A, Manzano R, Valentín J, Sagrario E, Cruz S, Gálvez (2006) Guía de cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana “NOM-O87-SEMARNAT-SSA1-2002”. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Secretaría de Salud. pp. 11 – 16.

Clark W, Seeker., Lee C. (1986) "Engineering Analysis of Hazardouse Waste Incineration: Energy and mass Balance", *ScienceDirect*, 7(1), 21 – 28.

CE (Convenio de Estocolmo). (2003) “Borrador de las Guías sobre Mejores Técnicas Disponibles y Mejores Prácticas Ambientales para la Incineración de Residuos Hospitalarios”. Resumen preparado por Cristina Cortinas de Nava, miembro del Grupo de Expertos en representación de México. Segunda Reunión del Grupo de Expertos Chile, 8-12 Diciembre. pp. 3 – 8.

Colin B. (2001) Química Ambiental. Reverté S.A. México. pp. 140 – 180.

DGMIC. (2001) Diagnóstico de la Situación Actual de la Incineración en México. III Foro Internacional de Incineración de Residuos. México, D.F., Noviembre 6 y 7.

DGMRRAR. (1998) La Incineración Dentro del Contexto de la Política Nacional de Residuos Peligrosos. Foro Internacional de Incineración de Residuos Peligrosos. México, D.F, Agosto 27 y 28. pp. 2 -6.

García A, Rosas A, Velasco H, Gómez J, Ramos G. (2001) Informe de la Situación y los Conocimientos Actuales sobre las Principales Fuentes y Emisiones de Dioxinas en México: Segundo Reporte. Instituto Nacional de Ecología. México. pp. 2 -10.

Gavilán A, Castro J. (2005) Las sustancias tóxicas persistentes en México. Capítulo 3. Dioxinas, Furanos y Hexaclorobenceno. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales – Instituto Nacional de Ecología. pp. 45 – 77.

Gutiérrez V, García A, Rosas A, Velasco H, Gómez J, Ramos, G. (2002) Informe de la situación y los conocimientos actuales sobre las principales fuentes y emisiones de dioxinas en México: Segundo Reporte, Revisión 1. Instituto Nacional de Ecología. México. pp. 4 – 10.

Hernández V. (2007) La aplicación de Modelos de Dispersión en la Evaluación del Impacto en la Calidad del Aire por Instalaciones Industriales. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. pp. 17 -32.

IAWG International Ash Working Group. (1997) Municipal Solid Waste Incinerator Residues. Elsevier, Amsterdam. pp. 974.

Jiménez B. (2001) La Contaminación Ambiental en México. Capítulo 3. Contaminación del Aire. Limusa, México. pp. 346.

Kimbrough D.E, Cohen Y, Winer A.M, Creelman L. and Mabuni C. (1999) A critical assessment of chromium in the Environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* , **29**(1), 1-46.

Lee. (1990) Medical Waste Incineration Handbook. Government Institutes, Inc.USA, pp. 3-15 – 4-16.

LGEEPA. (2003). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Porrúa, México, pp. 176.

Maíz Pablo. Tercer Foro de Investigación sobre Contaminantes Orgánicos persistentes en México. Organizado el Instituto Nacional de Ecología (INE) – SEMARNAT, México, DF, 20 y 21 de Mayo del 2008. pp. 3.

Manahan Stanley E. (2007) Introducción a la Química Ambiental. UNAM Reverté, México, pp. 629 – 634.

Manahan Stanley E. (1993) Environmental Chemistry. Lewis Publishers, USA, pp. 646 – 649.

Marin A. (2010) Evaluación, prevención y control de precursores de lluvia ácida en el estado de Veracruz. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de México, México, D.F. pp. 55- 63.

Mendoza Y y Yebra A. (2007) Diagnóstico de los Residuos Peligrosos Biológico – Infecciosos Generados en la Ciudad de Guanajuato, Gto. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Ambiental. Universidad de Guanajuato, México. pp. 4 – 16.

Michael D. LaGrega, Phillip L. Buckingham and Jeffrey C. Evans. (2001) Hazardous Waste Management. McGraw-Hill. USA, pp. 790 – 799.

Rhyner C, Schwartz L, Wenger R, Kohrell M. (1995) Waste Management and resource recovery. USA, pp. 544.

Roberts M, Teaf M, Bean A. (1999) Hazardous Waste Incineration. Evaluating the Human Health and Environmental Risks. Lewis Publishers. pp. 87 – 89.

Travis C, Cook C. (1989) Hazardous Waste Incineration and Human Health. CRS PRESS. pp. 53 – 74.

TYSA. (2009a) Diseño de un equipo teórico de incineración de residuos peligrosos. pp. 14 – 35.

TYSA. (2009b) Protocolo de Pruebas para la empresa Techno Ambiental, S.A. de C.V. pp. 5 – 40.

USEPA. (1990) Operation and Maintenance of Hospital Medical Waste Incinerators. Cincinnati. pp. 108. (EPA/625/6-89/024).

USPHS. (1998) TH Report on Carcinogens 1998 Summary. World Health Organisation (1989). Mercury. Environmental Health Criteria 86. *National Toxicology Program*, **63**(93), 26818 – 26820.

Wark. (1990) Dispersión de los contaminantes en la atmósfera. Capítulo 5. Modelo de Dispersión Gaussiano. Limusa – Wiley. pp. 24.

Wayne L. (1996) Biohazardous Waste, Risk Assessment, Policy, and Management. Capítulo 8. Medical Waste Incineration. John Wiley and Sons. pp. 156 – 295.

11 Referencias Electrónicas

Alvarado V, Gutiérrez V. (2003) Multimedia en internet. Análisis comparativo de la aplicación de dos métodos de cuantificación de liberaciones de dioxinas y furanos en México: Metodología EPA – Metodología PNUMA. Instituto Nacional de Ecología, México.

<http://www.ine.gob.mx>, (Consultado 15/08/2008).

Baldasano R. (2000) Multimedia en internet. Catedrático de Ingeniería. La incineración de residuos: ¿es una alternativa?.

<http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=287>, (Consultado 16/08/2008).

Bejarano F. (2000) Multimedia en internet. Estimando las liberaciones y priorizando las fuentes en el contexto del Convenio de Estocolmo.

<http://www.ipen.org>, (Consultado 20/08/2008).

Brigden K, Labunska I, Stringer R, Johnston P, Santillo, D. & Ashton, J. (2000) Multimedia en internet. Identificación de contaminantes orgánicos y metales pesados en muestras recolectadas del incinerador de desechos peligrosos y hospitalarios Trieco, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

<http://www.greenpeace.org>, (Consultado 22/08/2008).

CEPIS. (2005) Multimedia en Internet. “SI: 409 Basic Air Pollution Meteorology Course” del Instituto de Capacitación en la Contaminación del Aire (APTI) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA).

http://www.cepis.opsoms.org/bvsci/e/fulltext/orienta2/lecc6/lecc6_3.html,

(Consultado 12/05/2010).

Conesa J. (2009) Multimedia en el internet. Incineración Controlada de Residuos. Medición y Análisis de Dioxinas.

<http://iq.ua.es>, (Consultado 22/08/2008).

Convenio de Basilea. (2002) Multimedia en el internet: Guía para la Gestión Integral de los Residuos Peligrosos.

http://www.udt.cl/tl_files/www/descargas/seminario_geris/jm.pdf, (Consultado 22/08/2008).

Cortinas C. (2008) Multimedia en internet. Regulación de la Incineración de Residuos Sólidos Urbanos, de Manejo Especial y Residuos Peligrosos en México.

<http://www.cristinacortinas.net/index.php> - 20k, (Consultado 18/08/2008).

Costner P. (2006) Multimedia en internet. Estimando las liberaciones y priorizando las fuentes de dioxinas en el Convenio de Estocolmo. Owltree Environmental Consulting. Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México (RAPAM).

http://www.oztoxics.org/ipepweb/projects/project%20index_5_3.html#mexico,
(Consultado 23/08/2008).

Gavilán A, Castro J. (2009) Multimedia en digital. Capítulo 3. Dioxinas, furanos y hexaclorobenceno.
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/447/cap3.html>, (Consultado 24/08/2008).

INAFED . (2005) Multimedia en el internet. Datos sobre Lerma.
<http://www.inafed.gob.mx/work/templates/enciclo/mexico/mpios/15051a.htm>,
(Consultado 5/11/2009).

INE. (2005) Multimedia en internet. Factores de Emisión.
www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/457/estimacion3.pdf [En línea] / aut. INE. - 11 de Abril de 2005. (Consultado 2/Mayo/2009).

Lenntech. (2010) Multimedia en digital. Mercurio
<http://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm#ixzz10vmIBLXP> (Consultado 29/09/10)

Narváez I, Meneses C, Ruiz G, Calle L, Sánchez T. (2006) Multimedia en internet. Proyecto de asesoría técnica en incineradores de desechos hospitalarios. REPAMAR – MSP.
<http://www.cepis.ops-oms.org/cursoreas/e/fulltext/incinera.html>, (Consultado 23/03/2009).

Orozco J. (1997) Multimedia en internet. Tratamiento térmico de residuos sólidos y semisólidos en la industria petroquímica.
<http://www.monografias.com/trabajos23/residuos-petroquimica/residuos-petroquimica.shtml>, (Consultado 23/09/2008).

Parlamento Europeo. (2009) Fichas técnicas: Eliminación y tratamiento de residuo.
http://www.europarl.europa.eu/factsheets/4_9_4_es.htm, (Consultado 26/09/2008).

Redacción Ambientum. (2003) Multimedia en internet. Situación actual de la incineración de RSU. Revista Digital.
http://www.ambientum.com/revista/2003_05/incineracion.htm, (Consultado 16/05/2009).

REPAMAR. (2006) Multimedia en internet.
<http://www.cepis.org.pe/cursoreas/e/fulltext/incinera.html>, (Consultado 5/05/2009).

Ríos L. (2005) Multimedia en internet. Falta cultura en manejo de residuos infecciosos.
<http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?idarticulo=1153>,
(Consultado 26/12/2008).

Rosario. (2000) Multimedia en internet. ¿Por qué no a la incineración?
<http://www.noalaincineracion.org>, (Consultado 28/11/2009).

Rosas A. (2002) Multimedia en internet. Evaluación de la Eficiencia de Incineración de los Residuos Peligrosos en México.
http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/381/anabell.html?id_pub=381,
(Consultado 5/03/2009).

SEMARNAT. (2000) Multimedia en internet.
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/pue/resumenes/2000/21PU2000I0007.html>, (Consultado 7/03/2009).

SEMARNAT. (2002) Multimedia en internet.
<http://www.semarnat.gob.mx/>, (Consultado 7/03/2009).

SEMARNAT. (2009) Multimedia en internet.
<http://www.semarnat.gob.mx/tramitesyservicios/resolutivos/.../rubro7.pdf> -,
(Consultado 8/03/2009).

Solórzano G. (2000) Multimedia en internet. "Protocolos de pruebas para equipos de incineración de residuos peligrosos en México. Una visión crítica". II Foro Internacional de Incineración de residuos. Instituto Nacional de Ecología 16 y 17 de noviembre.
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cenica/solor.pdf>, (Consultado 15/05/2009).

Torres C, Boy M, Echaniz G. (2000) Multimedia en el internet. Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos en México: Algunos Aspectos Legales.
<http://www.hcwh.org>, (Consultado 23/03/2009).

USEPA. (1995a) Multimedia en internet. USEPA, "AP-42 Compilation of air pollutant emission factors, Volume 1:stationary point and area sources" 5th Ed.
<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>, (Consultado 12/03/2010)

USEPA. (1995b) Multimedia en internet. USEPA, Technology Transfer Network, Clearinghouse for Inventories and Emissions Factors
<http://cfpub.epa.gov/webfire/> , (Consultado 12/03/2010)

USEPA. (1997) Multimedia en internet. USEPA, Office of Air Quality Planning and Standards. Noviembre.
<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>, (Consultado 12/03/2010)

USEPA. (2010) Multimedia en internet. USEPA, Office of Air Quality Planning and Standards. Agosto de 2010
http://www.ehso.com/Air_AP_42.htm, (Consultado 12/03/2010)

ÍNDICE

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| LISTA DE ACRÓNIMOS | 1 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 2 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 3 |
| INTRODUCCIÓN..... | 4 |
| JUSTIFICACIÓN | 70 |
| 1 OBJETIVOS..... | 9 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 9 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 9 |
| 1.3 ALCANCES | 9 |
| 2 ANTECEDENTES..... | 10 |
| 2.1 <i>GENERALIDADES DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS BIOLÓGICO INFECCIOSOS (RPBI)</i> | 10 |
| 2.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS | 14 |
| 2.2.1 INCINERACIÓN..... | 14 |
| 2.3 ORIGEN..... | 16 |
| 2.4 DESCRIPCIÓN GENERAL SOBRE EL PROCESO DE INCINERACIÓN | 17 |
| 2.5 TIPOS DE INCINERADORES | 18 |
| 2.5.1 SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE INCINERACIÓN | 18 |
| 2.5.2 TIPOS DE INCINERADORES PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS BIOLÓGICO INFECCIOSOS. | 20 |
| 2.6 CONDICIONES DE LA COMBUSTIÓN | 26 |
| 2.7 PRODUCTOS DE LA INCINERACIÓN | 26 |
| 2.8 SISTEMAS DE CONTROL DE LAS EMISIONES..... | 30 |
| 2.8.1 REMOCIÓN DE LAS PARTÍCULAS | 31 |
| 2.8.2 REMOCIÓN DE GAS ÁCIDO | 31 |
| 2.9 OPCIONES DE SISTEMAS DE CONTROL | 32 |
| 2.9.1 VENTILADORES Y SOPLADORES | 34 |
| 2.9.2 ENFRIADORES Y CONDENSADORES | 34 |
| 2.9.3 ELIMINADORES DE NIEBLA | 35 |
| 2.9.4 CHIMENEA..... | 35 |
| 3 LEGISLACIÓN..... | 36 |
| 3.1 LEGISLACIÓN INTERNACIONAL | 36 |
| 3.1.1 CONVENCIÓN DE BASILEA..... | 36 |
| 3.1.2 CONVENCIÓN ESTOCOLMO..... | 36 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2 | LEGISLACIÓN EN LA COMUNIDAD ECONÓMICA EUROPEA | 37 |
| 3.3 | LEGISLACIÓN EN MÉXICO | 38 |
| 4 | <u>CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS INCINERADORES DE RPBI EN MÉXICO.....</u> | 41 |
| 4.1 | METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INCINERACIÓN | 41 |
| 4.1.1 | CRITERIOS DE COMBUSTIÓN | 43 |
| 4.2 | EFICIENCIA DE DESTRUCCIÓN Y REMOCIÓN (EDR) | 44 |
| 4.3 | PRINCIPALES CONTAMINANTES TÓXICOS EMITIDOS POR LOS INCINERADORES | 45 |
| 4.3.1 | DIOXINAS Y FURANOS..... | 45 |
| 4.3.2 | METALES PESADOS..... | 48 |
| 4.3.3 | MERCURIO | 48 |
| 4.3.4 | PARTÍCULAS ULTRA FINAS | 50 |
| 4.4 | EFFECTOS A LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE PROVOCADOS POR EQUIPOS INCINERADORES DE RPBI | 51 |
| 4.4.1 | EFFECTOS A LA SALUD | 51 |
| 4.4.2 | EFFECTOS AL AMBIENTE..... | 53 |
| 5 | <u>BASE TEÓRICA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES MEDIANTE FACTORES DE EMISIÓN.....</u> | 55 |
| 5.1 | DEFINICIÓN DE UN FACTOR DE EMISIÓN | 55 |
| 5.2 | USOS DE LOS FACTORES DE EMISIÓN | 56 |
| 5.3 | CLASIFICACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN | 57 |
| 6 | <u>BASE TEÓRICA PARA LA ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES MEDIANTE MODELOS DE DISPERSIÓN</u> | 61 |
| 6.1 | INTRODUCCIÓN..... | 61 |
| 6.2 | UTILIDAD DE LOS MODELOS | 63 |
| 6.3 | MODELOS DE DISPERSIÓN DE CALIDAD DEL AIRE | 64 |
| 6.3.1 | NIVELES DE SOFISTICACIÓN DE LOS MODELOS DE DISPERSIÓN | 65 |
| 6.3.2 | DISPONIBILIDAD DE LOS MODELOS | 65 |
| 6.4 | SELECCIÓN DE UN MODELO..... | 66 |
| 7 | <u>DISEÑO TEÓRICO DE UN EQUIPO INCINERADOR.</u> | 67 |
| 7.1 | DISEÑO DEL EQUIPO..... | 68 |
| 7.1.1 | BALANCE DE MASA..... | 69 |
| 7.2 | ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES A PARTIR DE FACTORES DE EMISIÓN | 74 |
| 7.3 | SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES | 76 |
| 7.4 | ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES A PARTIR DE UN MODELO..... | 78 |
| 7.5 | CASO DE ESTUDIO..... | 82 |
| 7.5.1 | DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA INCINERADORA A ESTUDIAR..... | 82 |
| 7.5.2 | UBICACIÓN | 82 |

| | | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------|------------------|
| 7.5.3 | DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO | 85 |
| 7.6 | COMPARATIVO DE EMISIONES TEÓRICAS Y REALES S DE LOS SISTEMAS | 90 |
| 8 | <u>CONCLUSIONES</u> | <u>91</u> |
| 9 | <u>RECOMENDACIONES.....</u> | <u>92</u> |
| 10 | <u>REFERENCIAS</u> | <u>93</u> |
| 11 | <u>REFERENCIAS ELECTRÓNICAS</u> | <u>96</u> |