

24



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**“INCINERACION DE RESIDUOS
EN HORNOS DE CEMENTO.
UNA ALTERNATIVA
AMBIENTALMENTE SEGURA”**

287210

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A:
ALEJANDRO MUNGUIA CRUZ

ASESOR : RICARDO PARAMONT HERNANDEZ GARCIA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



VERDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Incineración de Residuos en Hornos de Cemento,
una Alternativa Ambientalmente Segura.

que presenta el pasante: Alejandro Munguía Cruz.
con número de cuenta: 8351977-6 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Químico.

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 18 de agosto de 2000.

PRESIDENTE	Dr. Eligio P. Rivero Martínez.	
VOCAL	Dr. Adolfo Obaya Valdivia.	
SECRETARIO	M.en C. Ricardo P. Hernández García.	
PRIMER SUPLENTE	Dr. Enrique Angeles Anguiano.	
SEGUNDO SUPLENTE	I.Q. Margarita Alonso Espinosa.	

OBJETIVOS

- **Analizar la situación actual de la generación de los residuos peligrosos en el país, en cuanto a su clasificación, generación, infraestructura actual disponible para su manejo y aspectos legales con los que son regulados.**
- **Presentar distintas alternativas para el tratamiento de los residuos peligrosos, analizando ventajas y desventajas que ofrece cada uno de ellos en cuanto a su implementación y operación.**
- **Análisis de la destrucción térmica de residuos peligrosos en hornos cementeros, tipos de materiales factibles a ser destruidos y análisis de las consecuencias que genera la destrucción térmica de residuos peligrosos por este método.**
- **Evaluación de la destrucción de residuos peligrosos como una medida aceptable desde el punto de vista ambiental.**

INDICE

	Pag
Capítulo 1	
Residuos peligrosos, definición, impactos al ambiente, situación actual en México, legislación en la materia.	1
Capítulo 2	
Métodos de tratamiento de residuos peligrosos, ventajas y desventajas.	12
Capítulo 3	
Principios generales de la incineración y del proceso de producción del cemento.	31
Capítulo 4	
La degradación térmica de residuos peligrosos y sus productos	40
Capítulo 5	
Casos prácticos de destrucción térmica de residuos en hornos cementeros	53
Capítulo 6	
Conclusiones	63

CAPITULO 1

Residuos peligrosos, definición, impactos al ambiente, situación actual en México, legislación en la materia.

1.1 Definición de residuo peligroso

Existen diversas definiciones de residuos peligrosos, se mencionan a continuación algunas:

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, nos indica lo que es un residuo peligroso, diciéndonos que se consideran como tales "todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características, corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas, infecciosas o irritantes representan un peligro para el equilibrio ecológico o del ambiente"

El Banco Mundial define a un residuo peligroso como "aquellos diferentes a los radiactivos que por razones de su reactividad química, toxicidad, explosividad, corrosividad o alguna otra característica causan o puedan ocasionar daños a la salud o al ambiente, ya sea por si solo o al entrar en contacto con otros residuos y por tanto, requieran ser definidos como tales en el estado en que son generados y establecerse medidas especiales para su manejo, transporte y disposición"

Por otro lado la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE.UU. establece un listado de residuos clasificados específicamente como peligrosos y establece además que si algún compuesto no está incluido en ese listado y que reúna las características de inflamabilidad, corrosividad, reactividad y toxicidad de acuerdo a los criterios contenidos en el título 40 del Código de Regulaciones Federales ("Code of Federal Regulations") Parte 261, será clasificado como peligroso.

Tomando en cuenta estos conceptos para efectos del presente trabajo se considera el siguiente concepto:

"Residuo Peligroso es un material sin valor comercial que requiere de disposición debido a que por razones de sus propiedades de reactividad, toxicidad, explosividad, corrosividad o alguna otra ocasiona daños a la salud o al ambiente".

Se excluye de esta definición a los residuos radiactivos y biológico infecciosos ya que su tratamiento en general es distinto desde el marco normativo que los rige hasta los aspectos técnicos de su manejo.

Según la legislación mexicana existe otro grupo de residuos, los llamados residuos no peligrosos o municipales, los cuales son aquellos residuos de origen industrial o doméstico, incluidos los generados en actividades mineras, agropecuarias, agroindustriales y municipales que no presentan las características que hacen a un residuo peligroso.

Tanto los residuos peligrosos como no peligrosos afectan definitivamente a los ecosistemas y a la salud, aunque en general en menor grado los residuos no peligrosos.

1.2 Impacto al ambiente de los residuos peligrosos

En general todo residuo generado provoca problemas de contaminación y puede tener efectos nocivos a la salud o al medio ambiente si no es manejado adecuadamente, a lo anterior hay que agregar que los residuos industriales son en muchos casos sustancias o materiales no biodegradables o de alta persistencia en el medio ambiente.

Se menciona en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente que dado que los residuos son la principal fuente de contaminación de los suelos, es necesario prevenir y reducir la generación de estos e incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final.

Es evidente que en tanto se presente un avance en el sector industrial, necesariamente irá acompañado de un deterioro de la ecología, ahora bien el

impacto hacia esta última dependerá de la responsabilidad con la cual estos residuos sean manejados.

La afectación al ambiente es sin duda muy variada y está en función del tipo de sustancia de que se trate, pero son frecuentes los casos en los que se presenta un verdadero desastre por un mal manejo de estos materiales.

Uno de los grandes problemas en lo que se refiere a los residuos, es la que no se cuenta con un sistema integral que permita identificar el destino final que tienen estos desde su generación hasta su disposición final, ya que por un lado son pocas las empresas en México que se dedican a la recolección y tratamiento de los residuos, es decir existe una oferta de servicio superada por la necesidad del mercado y por otro lado no todos los generadores disponen adecuadamente los residuos, lo que llega a ocasionar no en pocas ocasiones que estos residuos sean vertidos, ya sea por desconocimiento o de una forma irresponsable, tanto a cuerpos de agua o al suelo con el consiguiente deterioro del ambiente.

1.3 Situación actual en México de los residuos peligrosos

1.3.1 Legislación actual en la materia

México tiene como base jurídica la Constitución política, esta da, regula y establece las bases del marco dentro del cual se realizará una política ambiental, para desarrollar e implementar las normas jurídico ambientales (ANIQ ' 1994).

El artículo 27 de la Constitución, sirve de sustento para la política ambiental de nuestro país. El mencionado artículo se tuvo que complementar y se otorgó al Congreso de la Unión la facultad de expedir leyes que establezcan la concurrencia del gobierno Federal, de los Gobiernos de los Estados y de los Municipios, en el ambiente de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

Con las reformas a la Constitución se hizo posible facultar al gobierno a preservar y restaurar el equilibrio ecológico de sus territorios, dándose desde el

inicio de 1988, una mayor actividad para regular la preservación del medio ambiente, de tal forma que se promulgó la Ley General de Equilibrio y Protección al Ambiente, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988.

Esta ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política Mexicana que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico en el territorio nacional. Esta ley surge de la necesidad de regular los efectos que provoca una rápida modernización de la economía y un incremento acelerado de la población en zonas urbanas.

Como complemento a la Ley General del Equilibrio y la Protección al Ambiente, se instrumentaron diversos Reglamentos para poder instrumentar las directrices descritas en la Ley.

Reglamento en materia de impacto ambiental.

Reglamento en materia de emisiones a la atmósfera

Reglamento en materia de residuos peligrosos

Este último fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de Noviembre de 1988, dentro de este reglamento se establece la necesidad de determinar si un residuo es peligroso o no y de inscribirlo en el registro de los residuos, establecido por la autoridad. Regula también el transporte, almacenamiento, recolección y **disposición final** de estos residuos, así como los sitios para su confinamiento, y las responsabilidades para quien se encuentre involucrado es estas actividades.

La importación y exportación de residuos peligrosos se realizará mediante la autorización (Guía Ecológica). Asimismo, prevé un sistema de medidas de control y seguridad, así como un sistema de control y vigilancia que se complementa con las sanciones.

Por otro lado establece que las autoridades del Departamento del Distrito Federal, de los Estados y Municipios podrán participar como auxiliares de la Federación en la aplicación de este reglamento, ya que la materia es federal.

Cabe mencionar que en Diciembre de 1996 se publicó la Nueva Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente la cual reforma, deroga y adiciona la ley anterior y fue el producto de las consideraciones y recomendaciones que fueron propuestas por diversos sectores de la sociedad durante la Consulta Nacional sobre legislación ambiental que fue convocada en el año de 1995.

Esta Ley faculta a la actual Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) a ejercerla.

Este dinamismo en la parte normativa de aspectos ambientales es un reflejo de las necesidades de regular las actividades industriales para que se pueda dar un desarrollo armonioso con el medio ambiente.

Si se toma en cuenta que los primeros intentos gubernamentales que pusieron atención a los problemas ambientales en los inicios de los 70's fueron a través de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente de la entonces Secretaría de Salubridad y Asistencia, es notable el desarrollo que se ha presentado en cuanto a regulación de aspectos ambientales y contaminación.

Esta Subsecretaría dio paso a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) en 1982 y se dieron las bases en lo relativo a la creación de normas, reglamentos y Leyes estatales de equilibrio ecológico y protección al ambiente.

Posteriormente de acuerdo a una reestructuración en la administración pública federal para crear la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) en mayo de 1992 con lo cual la atención a la problemática ambiental se daría como una de sus múltiples funciones. Para este efecto se crean como organismos desconcentrados de la SEDESOL al Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).

Dentro de las múltiples atribuciones de INE destaca la conducción, formulación y evaluación de la política general de ecología, en tanto que la PROFEPA se le encomendó principalmente la vigilancia de la legislación ambiental vigente.

Posteriormente se crea en Diciembre de 1994 la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) como el ente que conducirá la política nacional en materia de recursos naturales, así como en materia de

ecología incluyendo la actividad pesquera y la conservación de áreas naturales protegidas entre otras.

Igualmente sigue apoyada la SEMARNAP en el INE como en la PROFEPA, aunque en lo referente a residuos peligrosos, existe actualmente un área que atiende los aspectos relacionados con los residuos peligrosos, siendo ésta la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas.

Se aprecia en la figura 1 la evolución del sector público que se encarga de atender los aspectos ambientales.

EVOLUCION DEL SECTOR PUBLICO PARA ATENDER ASUNTOS AMBIENTALES

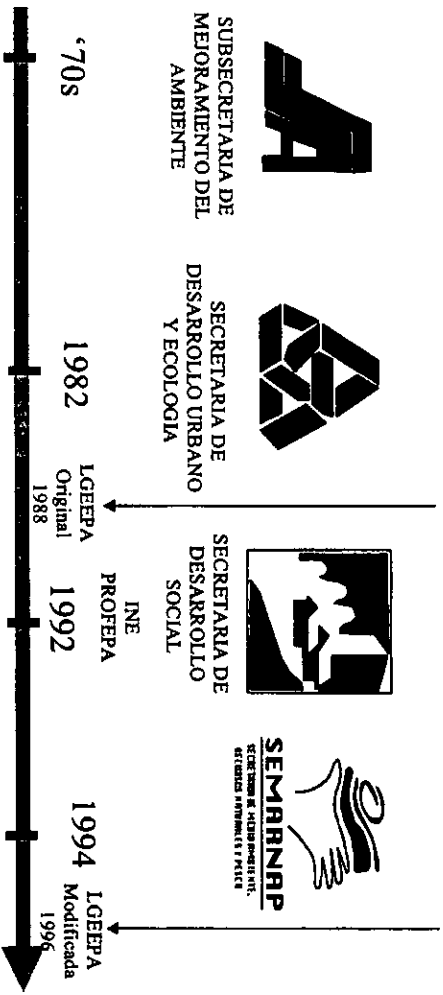


Figura 1

1.3.2 Generación

La estimación de la magnitud de residuos peligrosos en México es muy difícil de determinar con exactitud ya que por un lado no todos los generadores manifiestan el volumen manejado y por otro lado no se manejan estadísticas oficiales confiables. Ante esta situación se pueden manejar cifras del orden de magnitud y de una forma indirecta.

Para dar una idea del volumen generado, baste mencionar los siguientes hechos:

De acuerdo a estimaciones del Instituto Nacional de Ecología, en México se generan aproximadamente 8 millones de toneladas anuales (Cortinas ², 1997).

Las ciudades de Guadalajara, México y Monterrey cuentan con más de un tercio de la población y cerca del 40% de toda la industria se localiza dentro de sus áreas urbanas.

El estimado de la distribución geográfica de la generación de residuos peligrosos se presenta la siguiente tabla 1

Estos materiales se pueden clasificar de acuerdo a la rama industrial que los origina.

Entre las industrias que más contribuyen a la generación de los residuos peligrosos se encuentran la petroquímica básica, secundaria que en total aportan aproximadamente el 40% del total, seguidas por la industria metalmeccánica con 10%.

Se menciona que existen alrededor de 120,000 comercios sujetos a regulaciones ya sea de aire, agua o residuos. Se incluyen dentro de este estimado los solventes, grasas y aceites, pinturas y barnices, resinas.

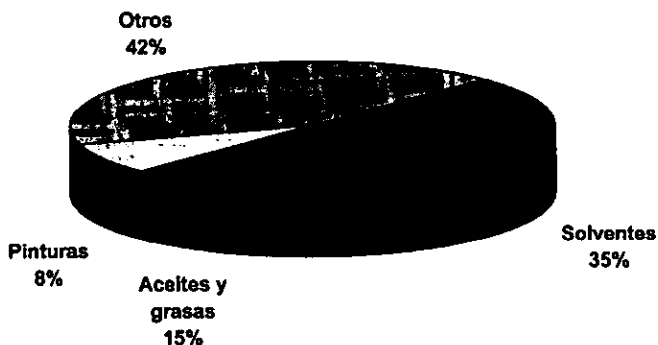
Estas cantidades son del orden de magnitud debida a la incertidumbre que se presenta en el manejo de cifras, aunque es una aproximación.

Tabla 1
Generación estimada de residuos peligrosos por estado

Estado	Miles de Toneladas al año
Aguascalientes	65
Baja California	160
Baja California Sur	10
Campeche	12
Coahuila	300
Colima	15
Chiapas	60
Chihuahua	210
Distrito Federal	1839
Durango	80
Estado de México	1415
Guanajuato	260
Guerrero	28
Hidalgo	135
Jalisco	600
Michoacán	120
Morelos	110
Nayarit	40
Nuevo León	800
Oaxaca	70
Puebla	245
Querétaro	178
Quintana Roo	8
San Luis Potosí	180
Sinaloa	80
Sonora	145
Tabasco	50
Tamaulipas	150
Tlaxcala	60
Veracruz	475
Yucatán	80
Zacatecas	20

De acuerdo a estimaciones, la distribución porcentual de residuos peligrosos está principalmente compuesta de solventes, aceites y grasas y pinturas, tal como se puede apreciar en la gráfica 1

Gráfica 1
Estimado de la distribución de la generación de residuos peligrosos



Dentro de la clasificación de otros es importante mencionar que es muy diversa la naturaleza de los materiales que se encuentran incluidos, tal es el caso de residuos derivados de resinas, ácidos y bases, derivados del petróleo, metales pesados, adhesivos, lodos, etc.

Lo anteriormente expuesto indica la necesidad de tener un sistema de rastreo de información para monitorear la generación, movimiento y tratamiento o eliminación de residuos industriales en México.

De acuerdo a cifras mencionadas por las autoridades del Instituto Nacional de Ecología, solo a 12% de los residuos generados en el país se les da algún tipo de tratamiento.

Parte de estos materiales que son confinados, se envían a relleno sanitario, el cual como posteriormente se expondrá, no es el mejor método, ya que el tratamiento de los residuos es muy específico.

1.3.3. Infraestructura actual

Toda instalación que tenga como propósito manejar residuos peligrosos tienen por obligación ser autorizada por el Instituto Nacional de Ecología. El concepto de manejo se refiere a las actividades de almacenamiento, recolección, transporte, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de los residuos peligrosos.

El INE publica periódicamente las empresas que se encuentran registradas para ofrecer el servicio de manejo de residuos peligrosos.

Empresas autorizadas para recolección y transporte	74
Empresas autorizadas para almacén temporal	12
Empresas autorizadas para reuso (tambores)	9
Empresa autorizadas para tratamiento de PCB's *	2
Empresas autorizadas para tratamiento en el sitio	12
Empresas autorizadas para reciclaje de aceites lubricantes	9
Empresas autorizadas para reciclaje de metales	8
Empresas autorizadas para preparar combustible alterno	4
Empresas autorizadas para incineración de comb. alterno	2
Empresas autorizadas para incineración de residuos	4
Empresas autorizadas para disposición final	4

* PCB's - Bifenilos Policlorados

La cantidad de empresas que son autorizadas se ha visto incrementadas en número y en actividades tanto de transporte, reciclaje y disposición final. Para lograr esta calificación deben de apegarse a las disposiciones que marca el Instituto Nacional de Ecología y su operación es seguida de cerca por la

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, la que es encargada de sancionar en casos de incumplimiento con lo dispuesto en la Ley.

Tal como se puede apreciar, la oferta de servicios actualmente disponible es sumamente limitada para resolver el grave problema que aqueja al país en cuanto a la excesiva generación de residuos peligrosos, la mayor parte son empresas que se dedican al transporte y son aún muy pocas para la amplia diversidad de materiales que se generan.

Existen autorizadas 4 empresas para la incineración de residuos, aunque tres de ellas se dedican a residuos de tipo biológico-infecciosos, generados en hospitales (MAREPEL en Culiacán, Sinaloa, ASESORIA y SERVICIOS ECOLOGICOS en Puebla y TRADEM en Lerma, México). La otra empresa que cuenta con una instalación autorizada para la incineración de residuos es el de Ciba Geigy, esta instalación inicialmente incineraba los residuos propios de la empresa, aunque a la fecha ofrece sus servicios al público.

Comercialmente existen actualmente dos confinamientos operando, siendo estos el de RIMSA ubicado en el norte del país en Mina, Nuevo León y CYTRAR, ubicado en Hermosillo, Sonora.

Las empresas autorizadas para quemado de combustible alterno (residuos peligrosos formulados para cubrir las especificaciones de combustibles), son cementeras cuyo suministro esta basado en residuos peligrosos líquidos, los cuales son formulados por empresas autorizadas.

Cabe mencionar que actualmente los grupos cementeros más importantes del país (CEMEX, APASCO, CRUZ AZUL y MOCTEZUMA) se encuentran desarrollando un programa de combustibles alternos (Fabian⁴, 1979). Adicionalmente al quemado de residuos líquidos, algunas plantas se encuentran destruyendo térmicamente residuos sólidos como lo son llantas de desechos y materiales impregnados con solventes y aceites. En un futuro se espera que sea ésta una práctica controlada por las autoridades ambientales en cuanto al otorgamiento de permisos.

CAPITULO 2

Métodos de tratamiento de residuos peligrosos, ventajas y desventajas.

Para escoger el método de disposición/tratamiento adecuado para los residuos peligrosos se debe de tomar en cuenta en primer lugar la naturaleza del residuo mismo, es decir, se debe de contar con una caracterización lo más completa posible, la segunda fase del tratamiento/disposición será la elección del método o proceso en sí.

La generación de residuos es un evento que necesariamente se da en toda actividad industrial, ya sea por productos fuera de especificación, generación de subproductos, por reemplazo de materiales que se degradan con el uso, etc.

Dependiendo del proceso de generación del material residual, pueden hacerse mejoras tecnológicas en el mismo para minimizar la cantidad o aminorar los efectos nocivos al ambiente, pero una vez que ha salido del ámbito del generador se enfrenta la situación de qué hacer con el material residual peligroso.

De aquí surge la necesidad de darle un tratamiento a estos materiales a fin de disminuir o anular sus propiedades tóxico-peligrosas, aunque en este caso se presenta la disyuntiva de saber cuál es la mejor alternativa para darle un tratamiento adecuado a estos materiales.

Ante este planteamiento, se debe de tomar en cuenta que existe una amplia gama de posibilidades de resolver el problema de tratamiento/disposición, para la elección del mismo se deberán considerar criterios de tipo técnico-económico de tal forma que el proceso elegido sea el adecuado para cada necesidad.

Para efectos del presente documento, la revisión de los procesos es solamente para tener una visión más amplia de la diversidad de métodos existentes, un estudio más profundo de todos los detalles que involucra cada una de estas tecnologías está fuera del alcance del presente trabajo, por tanto sólo se revisarán las bases generales de los mismos, ventajas, desventajas, tipos de residuos apropiados para cada tecnología y estado de la misma.

Tal como se podrá observar estos procesos pueden ser complementarios para dar una solución integral al tratamiento/disposición de residuos peligrosos.

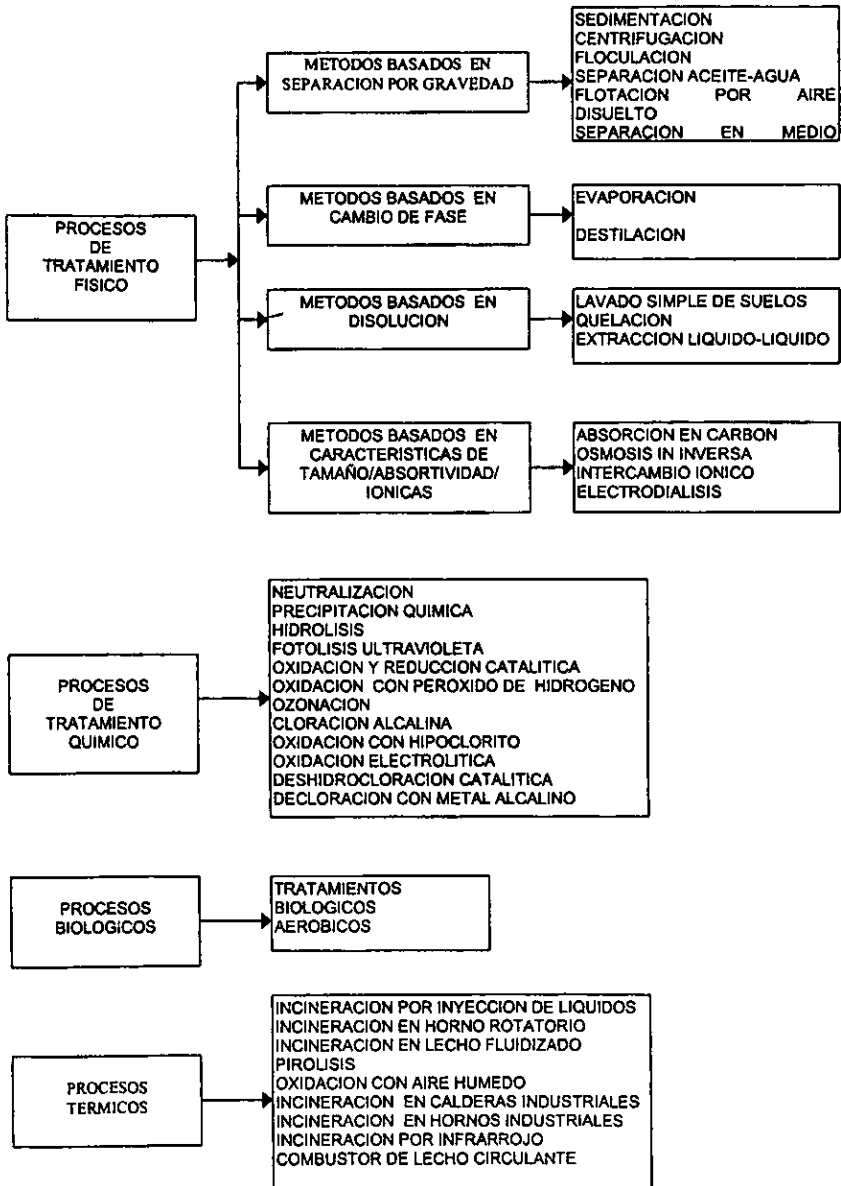
En términos generales los métodos de tratamiento disposición de residuos peligrosos se clasificarán de acuerdo al principio en el cual están basados, la Agencia de Protección al Ambiente de EUA clasifica los procesos de la siguiente forma (EPA ¹⁴, 1992):

1. Procesos de tratamiento físico
2. Procesos de tratamiento químico
3. Procesos biológicos
4. Procesos de destrucción térmica

Estos procesos se subdividen en una amplia variedad, la cual se esquematiza en la figura 2:

Figura 2

ESQUEMA GENERAL DE PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS.



A continuación se describirán brevemente cada uno de estos procesos

2.1 Procesos de tratamiento físico

Los procesos descritos aquí son aquellos que utilizan características físicas para efectuar la separación o concentración de los constituyentes de una corriente de residuo. Ya que algunos son similares en cuanto al principio de aplicación se analizarán en cuatro grupos: procesos por separación por gravedad, procesos por cambio de fase, procesos basados en disolución y procesos basados en características de tamaño, absortividad y iónicas.

2.1.a Métodos basados en separación por gravedad

- **Sedimentación.-** La sedimentación permite que los sólidos pesados se colecten en el fondo de un recipiente o contenedor resultando en la separación del fluido en el cual está suspendido. Este proceso se puede efectuar en lotes o continuo. Su uso está restringido a sólidos que son más densos que el agua y no es apropiado para residuos que tengan aceites emulsificados.
- **Centrifugación.-** Este tratamiento está basado en el uso de una fuerza centrífuga y se limita a eliminar el contenido de agua en lodos, incluyendo lodos que contengan metales, separación de aceite contenido en agua y clarificación de gomas viscosas y resinas. La eficiencia de este método se puede mejorar incorporando filtros más eficientes en las centrifugas.
- **Floculación.-** La floculación es una tecnología usada para mejorar la centrifugación o la sedimentación. La corriente del residuo se mezcla con un agente floculante, de tal forma que una vez unido este agente a sólidos suspendidos resulta en partículas demasiado grandes para permanecer en suspensión. Este método se utiliza principalmente para la precipitación de inorgánicos.
- **Separación aceite/agua .-** Como en la sedimentación, la fuerza de gravedad se usa para separar dos o más líquidos inmiscibles con suficiente diferencia de densidad tal como el aceite y el agua. La separación líquido/líquido

ocurre cuando la mezcla de líquidos se decanta. La corriente de residuo fluye a una cámara donde se mantiene en reposo y se permite su decantación. La fase aceitosa se extrae de la parte superior mientras que el agua fluye o el efluente fluye en la porción inferior de la cámara. Se pueden usar ácidos para romper la emulsión aceite/agua y mejorar el proceso permitiendo una mayor eficiencia en la remoción del aceite. Este proceso es más bien una etapa de pretratamiento para el caso de que dadas las características de la fase aceitosa lo requiera.

- Flotación por aire disuelto .- Este es un proceso físico en donde las partículas suspendidas o líquidos mezclados se pueden remover de una corriente de residuo. La mezcla a ser separada se satura con aire (o algún otro gas como el nitrógeno). A medida que el aire sale de la solución, las microburbujas que son formadas pueden absorberse rápidamente sobre los sólidos o aceites mejorando sus características de flotación. En la cámara de flotación, el aceite separado u otras partículas que floten se remueven de la parte superior, en tanto que los líquidos acuosos se extraen en la parte inferior. Esta tecnología se aplica sólo a residuos cuyas densidades son cercanas a las del agua. El control de emisiones de aire se hace necesario si están presentes en el residuo orgánicos volátiles peligrosos.
- Separación en medio pesado .- Este es un proceso para separar dos materiales sólidos que posean una diferencia significativa de densidades absolutas. Los sólidos mezclados a ser separados se colocan en un fluido cuya densidad específica se escoge (o ajusta) de tal forma que los sólidos ligeros floten en tanto que los pesados se hundan. Usualmente el fluido de separación (el medio pesado) es una suspensión de magnetita en agua. La gravedad específica del fluido es entonces ajustable al variar la cantidad de polvo de magnetita utilizada. La magnetita puede ser fácilmente recuperada magnéticamente de los enjuagues y derrames y entonces ser reutilizada. Esta tecnología es utilizada ampliamente en minería pero presenta la desventaja que los sólidos no se pueden disolver y que el medio pesado se puede degradar además de que la etapa de recuperación de medio pesado representa un costo adicional .

2.1.b Métodos basado en cambio de fase

- **Evaporación .-** La evaporación es la separación física de un líquido de un sólido disuelto o suspendido mediante la aplicación de energía para volatilizar el líquido. En el tratamiento de residuos peligrosos la evaporación se puede usar para aislar el material en una de las dos fases, simplificando el tratamiento posterior. El material a volatilizar debe de ser estable. La evaporación se aplica a residuos de solventes contaminados con aceite, grasa, resinas poliméricas o partículas de pinturas. El solvente se evapora y recupera para reuso. El residuo es la corriente de fondo y contiene regularmente 30-50% de sólidos, por otro lado los solventes recuperados pueden ser utilizados en otros servicios que no requieran una alta pureza
- **Destilación .-** La destilación es el simple proceso de evaporación seguido de una condensación. La separación se puede optimizar controlando los parámetros básicos (presión y temperatura). La destilación separa los líquidos orgánicos miscibles para una recuperación de solventes y para reducción del volumen de residuos. Los residuos resultantes son los fondos (muy a menudo con metales pesados y pigmentos). El proceso se realiza tanto en lotes o continuo. La destilación se utiliza para separar residuos líquidos orgánicos, principalmente solventes gastados, para recuperación parcial o total. Los solventes tanto halogenados como no halogenados se pueden recuperar vía destilación. Los líquidos deben de tener distinta volatilidad, si se forman azeótropos el costo de la energía puede verse incrementado sensiblemente. El arreglo del equipo así como las dimensiones del equipo de destilación dependerá de las características del residuo a tratar. No se puede aplicar la destilación fraccionada a líquidos con una alta viscosidad a alta temperatura o alta concentración de sólidos

2.1.c Métodos basados en disolución

- **Lavado simple y a chorro de suelos .-** El lavado a chorro de suelos es una extracción en el sitio de compuestos orgánicos e inorgánicos de suelos y se logra pasando solventes extractores a través de suelos usando procesos de inyección/recirculación. Estos solventes pueden incluir agua, mezclas surfactantes, ácidos o bases (para orgánicos), agentes quelantes, agentes

oxidantes o reductores. El lavado simple de suelos es un tratamiento similar solamente que el suelo se excava y se trata en la superficie con un lavador de suelos. Para que estos procesos operen bien se debe de contar con agentes con buenos coeficientes de extracción, baja volatilidad y toxicidad, ser seguros y fáciles de manejar además de ser reciclables y recuperables. Esta tecnología esta aún en desarrollo.

- Quelación .- El principio de este método se basa en el hecho de es posible que los metales que se encuentren presentes en solución a ciertas condiciones puedan formar sales iónicas que precipiten y de tal forma se puedan separar de la solución. La presencia de grasas y aceites puede interferir con el proceso.
- Extracción líquido/líquido .- Dos líquidos que están bien mezclados o son mutuamente solubles pueden ser separados por extracción líquido/líquido. El proceso requiere el uso de un tercer líquido agregado a la mezcla original. Este tercer líquido debe ser solvente para uno de los compuestos originales, pero debe ser insoluble o inmisible en el otro. La corriente final de solvente/soluto puede ser posteriormente separada por destilación o por medios químicos y extraer el solvente capturado para reuso. Este proceso tiene la limitante que raramente se logra una separación completa, de tal forma que se requiere un post-tratamiento para cada corriente separada, requiriendo por tanto una destilación o agotamiento.

2.1.d Métodos basados en características de tamaño/absortividad/iónicas

- Filtración .- La filtración se utiliza para disminuir contenido de agua de lodos o lechadas como un pretratamiento para otros procesos. La filtración con un medio granular se usa regularmente después de un proceso de separación por gravedad, para una remoción adicional de sólidos suspendidos y aceites antes de otro proceso de tratamiento. También se usa como una etapa adicional para residuos tratados para reducir los sólidos suspendidos. El pretratamiento por filtración es apropiado para procesos de separación por membrana , intercambio iónico y absorción con carbón para prevenir taponamientos o saturación de estos procesos. La filtración de residuos decantados se requiere para metales pesados no disueltos que están

presentes en los sólidos suspendidos. La filtración no reduce la toxicidad del residuo. La filtración no debe de ser usada con lodos pegajosos o gelatinosos, debido al taponamiento del medio filtrante.

- **Absorción en carbón** .- La química del carbón es tal que la mayoría de los compuestos orgánicos y muchos inorgánicos se unen con átomos de carbono con cierta facilidad. La fuerza de la unión (y por tanto la energía requerida para la desorción posterior) depende del enlace formado, el cual depende a su vez del compuesto específico que está siendo absorbido. El carbón a ser usado para la absorción usualmente se trata para producir un producto con una relación alta de superficie-volumen, maximizando el número de carbonos absorbedores activos. El carbón tratado de esa forma se le llama carbón activado para absorción. El carbón activado que ha absorbido demasiado contaminante de tal forma que su capacidad absorbiva se ha disminuido severamente se dice que es un carbón gastado. El carbón gastado se puede regenerar, pero para contaminantes fuertemente absorbidos, el costo de tal regeneración puede ser mayor que simplemente reemplazar con carbón nuevo. Este proceso se usa para tratar residuos orgánicos clorados acuosos de una sola fase con un alto peso molecular y alto punto de ebullición, además de baja solubilidad y polaridad, tal como el tetracloroetileno y aromáticos como el fenol. También se usa para capturar volátiles orgánicos en mezclas gaseosas . Las limitaciones son regularmente las económicas y se relacionan con la rapidez con la que el carbón se gasta. Los criterios para escoger este proceso son que las concentraciones deben de ser de 10,000 ppm de contaminante , sólidos suspendidos menos de 50 ppm, inorgánicos disueltos y grasas y aceites menos de 10 ppm.
- **Ósmosis inversa** .- En procesos osmóticos normales, el solvente fluirá a través de una membrana semipermeable de una concentración diluida a una más concentrada hasta que el equilibrio se alcance. La aplicación de una alta presión al lado concentrado causará que este proceso se invierta. El resultado será que el solvente fluya de la concentración alta dejando una solución mucho más concentrada de soluto. La membrana semipermeable debe ser plana o tubular , pero sin importar la forma actuará como un filtro debido a la fuerza motriz de la presión. Para obtener un proceso de ósmosis

inversa eficiente, las propiedades físicas y químicas de la membrana semipermeable deben de ser compatibles con el residuo. Algunas membranas pueden ser disueltas por algunos residuos. Los sólidos suspendidos y algunos orgánicos pueden obstruir el material de la membrana y algunas sales pocos solubles pueden precipitarse sobre la superficie de la membrana.

- Intercambio iónico.- Aunque existen medios naturales de intercambio de iones, el proceso se basa usualmente en el uso de resinas específicamente formuladas. El intercambio de iones depende del potencial electroquímico del ion a ser recuperado en contra de la del ion intercambiado y también de la concentración de los iones en solución. Cuando se excede la capacidad de recuperación de iones de la resina se dice que está gastada, razón por la cual hay que regenerarla. Esta regeneración se efectúa exponiéndola a una solución concentrada del ion de intercambio original, de tal manera que el intercambio se efectúa en forma inversa, resultando una resina regenerada y una solución concentrada del ion removido la cual puede ser tratada para recuperación y reuso. El proceso es comúnmente utilizado para remover iones de metales tóxicos de soluciones. Los residuos resultantes incluyen resinas gastadas y regenerantes gastados tales como ácidos y bases. Esta tecnología se usa para tratar residuos con metales incluyendo cationes (Ni^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+}) y aniones (CrO_4^{2-} , etc.). Las limitaciones son selectividad, pH y sólidos suspendidos. No se recomienda para soluciones muy concentradas de contaminantes.
- Electrodialisis .- La electrodialisis concentra o separa especies iónicas contenidas en soluciones acuosas. En electrodialisis, una solución acuosa se pasa alternadamente a través de membranas catión permeables y anión permeables respectivamente. Se aplica un potencial eléctrico a través de la membrana para proveer la fuerza motriz para el ion de migración. Las membranas ion selectivas son hojas delgadas de resina de intercambio iónico reforzadas por un respaldo de fibra sintética. Este proceso está bien establecido para purificar agua y recientemente se ha demostrado para la recuperación de sales metálicas de lavados de platinado.

2.2. Procesos de tratamiento químico

- **Neutralización** .- Cuando una sal iónica se disuelve en agua, algunas de las moléculas de agua se rompen en sus constituyentes iónicos de H^+ y OH^- . La neutralización es el proceso de cambiar los constituyentes en una solución iónica hasta que el número de iones hidrógeno (H^+) presente se balancee con el número de iones hidroxilo (OH^-). La falta de balance se mide en términos de la concentración del ión hidrógeno (H^+) y es llamado comúnmente pH de la solución. La neutralización se usa para tratar residuos ácidos y alcalinos a fin de eliminar o disminuir su reactividad o corrosividad. La neutralización puede ser un tratamiento barato, especialmente si el residuo alcalino se puede utilizar para tratar residuos ácidos y viceversa. Los residuos incluyen un efluente neutral que contiene sales disueltas y precipitadas. El proceso debe de ser realizado en un sistema bien mezclado para asegurar una neutralización completa. Se debe tener mucho cuidado para asegurar la compatibilidad de los residuos y los químicos de tratamiento para prevenir la formación de compuestos más peligrosos o tóxicos de los originalmente presentes.
- **Precipitación química** .- Como en la neutralización, la precipitación química es un proceso de ajuste de pH. Para lograr la precipitación, se agrega un ácido o una base hasta el punto en donde los constituyentes a ser removidos tienen su más baja solubilidad. La precipitación química facilita la remoción de metales disueltos de residuos acuosos. Los metales se pueden precipitar de la solución como hidróxidos, sulfuros, carbonatos, u otras sales insolubles. La precipitación de hidróxidos con cal es la más común, sin embargo, el sulfuro de sodio es usado para lograr bajas concentraciones de metales del efluente. Los residuos resultantes son lodos con metales y el efluente tratado el cual posee un alto pH y en el caso de precipitación con sulfuros exceso de sulfuros. Esta tecnología se usa para tratar residuos que contengan metales. Las limitaciones incluyen el hecho de que no todos los metales tienen un pH óptimo común al cual ellos precipiten. Los agentes quelantes y complejantes pueden interferir en el proceso.

- **Hidrólisis química** .- La hidrólisis es el proceso de romper un enlace en una molécula (la cual usualmente no es soluble en agua) de tal forma que pasará a la solución iónica con agua. La hidrólisis puede ser lograda por la adición de químicos (ácido para hidrólisis), por irradiación (fotólisis), o biológicamente (rompimiento enzimático). Este método es aplicable a un amplio rango de orgánicos, para la hidrólisis en el sitio debe tenerse cuidado ya que se pueden movilizar los metales pesados presentes.
- **Fotólisis ultravioleta** .- La fotólisis ultravioleta es un proceso que destruye o detoxifica químicos peligrosos en solución utilizando irradiación con luz ultravioleta. La absorción de la energía en el espectro ultravioleta resulta en una elevación del estado de energía de la molécula a un nivel superior, incrementando la facilidad de dividir los enlaces y una subsecuente oxidación de la molécula. Por ejemplo, la luz ultravioleta ha sido usada para la degradación de dioxinas en todos residuales. Este proceso requiere la extracción de residuo a ser destruido en un solvente limpio y transparente. Los productos de reacción son materiales de-clorados y libres de gas cloro. Existe la limitante de que la luz ultravioleta no puede penetrar y destruir contaminantes en suelos o en soluciones opacas.
- **Oxidación y reducción química** .- La oxidación y reducción deben de llevarse a cabo en cualquier reacción. En cualquier reacción de reducción el estado de oxidación de un compuesto se eleva (oxida) mientras que el estado de oxidación de otro compuesto se baja. (reduce). Las reacciones de oxidación y reducción se utilizan para cambiar la forma química de un material peligroso a fin de dar un compuesto menos tóxico o para cambiar su estabilidad, solubilidad, separabilidad u otro cambio para propósitos de manejo o disposición. En la reacción , el compuesto que proporciona oxígeno (cloro u otro ion negativo) se llama agente oxidante , mientras que el compuesto que acepta el oxígeno (el que da el ion positivo) se le llama agente reductor. La reacción se puede ver mejorada por catálisis, electrólisis o irradiación. El proceso se llama oxidación química cuando el propósito es disminuir el estado de oxidación de un compuesto. Ejemplos de agentes reductores incluyen compuestos de hierro, aluminio, zinc, y sodio. Para que el proceso de reducción ocurra eficientemente, el pH de la solución se debe ajustar a un nivel adecuado. Después que se logra esta etapa, se

- **Hidrólisis química** .- La hidrólisis es el proceso de romper un enlace en una molécula (la cual usualmente no es soluble en agua) de tal forma que pasará a la solución iónica con agua. La hidrólisis puede ser lograda por la adición de químicos (ácido para hidrólisis), por irradiación (fotólisis), o biológicamente (rompimiento enzimático). Este método es aplicable a un amplio rango de orgánicos, para la hidrólisis en el sitio debe tenerse cuidado ya que se pueden movilizar los metales pesados presentes.
- **Fotólisis ultravioleta** .- La fotólisis ultravioleta es un proceso que destruye o detoxifica químicos peligrosos en solución utilizando irradiación con luz ultravioleta. La absorción de la energía en el espectro ultravioleta resulta en una elevación del estado de energía de la molécula a un nivel superior, incrementando la facilidad de dividir los enlaces y una subsecuente oxidación de la molécula. Por ejemplo, la luz ultravioleta ha sido usada para la degradación de dioxinas en todos residuales. Este proceso requiere la extracción de residuo a ser destruido en un solvente limpio y transparente. Los productos de reacción son materiales de-clorados y libres de gas cloro. Existe la limitante de que la luz ultravioleta no puede penetrar y destruir contaminantes en suelos o en soluciones opacas.
- **Oxidación y reducción química** .- La oxidación y reducción deben de llevarse a cabo en cualquier reacción. En cualquier reacción de reducción el estado de oxidación de un compuesto se eleva (oxida) mientras que el estado de oxidación de otro compuesto se baja. (reduce). Las reacciones de oxidación y reducción se utilizan para cambiar la forma química de un material peligroso a fin de dar un compuesto menos tóxico o para cambiar su estabilidad, solubilidad, separabilidad u otro cambio para propósitos de manejo o disposición. En la reacción , el compuesto que proporciona oxígeno (cloro u otro ion negativo) se llama agente oxidante , mientras que el compuesto que acepta el oxígeno (el que da el ion positivo) se le llama agente reductor. La reacción se puede ver mejorada por catálisis, electrólisis o irradiación. El proceso se llama oxidación química cuando el propósito es disminuir el estado de oxidación de un compuesto. Ejemplos de agentes reductores incluyen compuestos de hierro, aluminio, zinc, y sodio. Para que el proceso de reducción ocurra eficientemente, el pH de la solución se debe ajustar a un nivel adecuado. Después que se logra esta etapa, se

agrega el agente reductor y la solución resultante se mezcla hasta que se complete la reacción. Este tratamiento puede ser aplicado a químicos tales como cromo hexavalente, mercurio y plomo. Es factible que se puedan usar otros tratamientos con en conjunto con la reducción química. Los sólidos deben de estar en solución. La reacción puede ser explosiva. La composición debe de ser bien conocida para prevenir la producción inesperada de productos finales mas tóxicos o peligrosos.

- Oxidación con peróxido de hidrógeno .- Esta tecnología se basa en la adición de peróxido de hidrógeno para oxidar compuestos orgánicos. Ya que el peróxido de hidrógeno no es un óxido de hidrógeno muy estable , y dado que cede fácilmente su oxígeno extra, es un excelente agente oxidante. Este proceso puede ser exotérmico/explosivo y requiere la adición de calor y/o catalizador. La oxidación con peróxido de hidrógeno no es aplicable a tratamiento en el sitio. Sin embargo puede ser usada para tratamiento de superficies o de lodos contaminados.
- Ozonación .- El ozono es una molécula que contiene tres átomos de oxígeno. Es relativamente inestable y por tanto es químicamente ideal como oxidante. La ozonación es un proceso de oxidación química apropiado para corrientes acuosas cuyo contenido sea menos de 1% de compuestos oxidables. El ozono se puede usar como pretratamiento de residuos para romper orgánicos refractarios o como una etapa adicional después de un tratamiento biológico u otro tratamiento para oxidar orgánicos. El ozono es usualmente producido por una ionización con alto voltaje de oxígeno atmosférico. El ozono se usa actualmente para tratamiento de residuos peligrosos para destruir compuestos de cianuro y fenólicos. La rápida oxidación de cianuros con ozono ofrece ventajas en contra de métodos de cloración alcalina más lentos. Las limitaciones incluyen la forma física del residuo (sólidos y lodos no son fácilmente tratados) y competición no selectiva con otras especies.
- Cloración alcalina .- Cuando Se agrega cloro a residuos, bajo condiciones alcalinas, ocurren reacciones que llevan a la oxidación (cloración) de los contaminantes. Este proceso de oxidación es ampliamente utilizado en el tratamiento de residuos con cianuros, se refiere generalmente como proceso

de cloración alcalina. Los cianuros se pueden oxidar con cloro para dar cianuros menos tóxicos. La adición de cloro oxidará los cianuros originando gas nitrógeno, dióxido de carbono y bicarbonatos. La presencia de Fe o Ni pueden ocasionar interferencias alargando el tiempo del proceso. Se genera calor durante la reacción y se requiere la adición de cloro adicional, además se debe tener un control de pH para evitar la liberación de volátiles tóxicos.

- Oxidación con hipoclorito .- Este procesos consiste en la adición de hipoclorito de sodio o calcio (agentes blanqueadores) para oxidar residuos orgánicos. Tal tecnología ha sido usada comúnmente como método de desinfección de piscinas. Este método puede producir subproductos orgánicos clorados tóxicos y se debe hacer bajo condiciones controladas.
- Oxidación electrolítica .- En este proceso los cátodos y ánodos se sumergen en un tanque que contenga los residuos a ser oxidados, y se aplica una corriente eléctrica al sistema. Este proceso es particularmente aplicable a residuos que contengan cianuros. Los productos de reacción son amoniaco, urea y dióxido de carbono. Durante la descomposición los metales son depositados en los cátodos. La oxidación electrolítica se usa para tratar altas concentraciones de cianuros (hasta 10%) y para separar metales para permitir su recuperación potencial. Las limitaciones incluyen la forma física de la alimentación (los sólidos deben de estar disueltos), la competición no selectiva con otras especies y tiempos largos de proceso.
- Deshidrocloración catalítica .- La deshidrocloración catalítica se basa en la reacción de hidrocarburos policlorados con gas hidrógeno a alta presión en presencia de catalizador. La alimentación debe ser ya sea líquida o gaseosa con los inorgánicos e inertes removidos. La temperatura de operación es de 350 a 375°C bajo 30 a 50 atm. La cantidad de catalizador es usualmente menos de 1% del peso del contaminante. En general los catalizadores se desactivan fácilmente por impurezas como brea o compuestos de azufre. Este proceso es costoso y requiere el uso de químicos peligrosos como catalizador.
- Decloración con metal alcalino .- El propósito de este proceso es desplazar el cloro de compuestos orgánicos clorados contenidos en aceites y residuos

líquidos. Usualmente el residuo se debe de filtrar antes de entrar al sistema de reacción en donde se encontrará con el agente decolorante. La base química de este proceso es la gran afinidad que tienen los metales alcalinos por el cloro, aunque se deben de incluir tratamientos adicionales de centrifugación y filtración. Los subproductos son sales, polímeros y ocasionalmente metales. Este proceso se usa para tratar PCB's, otros hidrocarburos clorados, ácidos, tioles y dioxinas. El contenido de humedad puede afectar adversamente las velocidades de reacción, por tanto se debe de eliminar el contenido de humedad como pretratamiento.

2.3 . Procesos biológicos

- **Tratamientos biológicos aeróbicos** .- Los hidrocarburos pueden ser catabolizados (rotos en sustancias más simples) por microorganismos usando tres mecanismos generales. Estos son respiración aeróbica, respiración anaerobia y fermentación. En general los procesos de degradación aeróbica son más usados para biodegradación debido a que son más rápidos y completos, además de que no se producen metano y sulfuro de hidrógeno. Estos procesos se usan para tratar residuos acuosos contaminados con bajos contenidos de orgánicos no halogenados. El tratamiento requiere condiciones de operación muy estables.

2.4 . Procesos de destrucción térmica

- **Incineración por inyección de líquidos**.- En este caso se atomiza el residuo líquido y se mezcla con aire y el combustible necesario para ser introducidos por medio de boquillas especialmente diseñadas en una cámara de combustión, el rango de temperaturas es aproximadamente 600-650 °C, se aplica a residuos orgánicos con alto contenido de humedad
- **Incineración en horno rotatorio**.- El horno rotatorio es un tubo largo e inclinado en donde se alimentan los residuos al final del horno, al girar el horno se causa turbulencia que mejora la combustión, el combustible auxiliar se inyecta por el otro extremo. Se pueden quemar sólidos ocasionalmente acompañados de líquidos y gases, los gases pasan a otra cámara secundaria para una mayor oxidación. Los gases requieren tratamiento y las

cenizas requieren solidificarse y acondicionarse para enviar a relleno. Este proceso puede generar altas emisiones de partículas por lo que es crítico el control de la post-combustión.

- Incineración en lecho fluidizado.- Los incineradores de lecho fluidizado utilizan un lecho muy turbulento para mejorar la transferencia de calor. el lecho está hecho de material inerte (arena), introduciendo aire para suspender el material, el residuo se introduce en múltiples puertos de inyección. Este tratamiento es ideal para lechadas y lodos, pero no para líquidos viscosos, el tamaño de la partícula debe ser homogéneo con bajo contenido de sodio o metales, se alcanzan temperaturas de operación en el rango 750-1,000 °C. Aún no se tienen unidades a gran escala.
- Pirólisis .- La pirólisis es la descomposición química del residuo, calentando el material en ausencia de aire. El sistema está compuesto de dos cámaras de combustión, en la primera se lleva a cabo el calentamiento, separando los materiales volátiles (vapor, gases combustibles, etc.) de los no volátiles (cenizas, sales, metales, etc.). En la segunda cámara se lleva a cabo la combustión con el aire, temperatura y tiempo de residencia adecuado. El calentamiento del material se puede efectuar de forma directa con gases calientes de combustión provenientes de un quemador o por calentamiento con arco eléctrico o quemador externo. La pirólisis es adecuada para manejar lotes o material en tambores y de forma continua puede manejar líquidos. Este método presenta ventajas para disponer de residuos líquidos viscosos, con alto contenido de cenizas, sales y metales. Además se puede recuperar energía por medio de una caldera. La pirólisis tiene limitaciones en cuanto a que requiere combustible auxiliar, tiene actualmente baja capacidad de procesamiento y el residuo final puede formar lechadas que deben ser tratadas de otra forma.
- Oxidación con aire húmedo .- La oxidación con aire húmedo usa temperatura y presión elevadas para oxidar orgánicos disueltos o finamente divididos. Los productos de oxidación permanecen disueltos o suspendidos, en tanto que los gases de salida presentan niveles bajos de NOx y SOx. Este método tiene la ventaja de que se pueden tratar residuos con concentraciones de orgánicos muy bajas con alto contenido de humedad

cuya disposición final por incineración tendría un costo muy elevado, por otro lado tiene la ventaja de que los productos de oxidación permanecen en la fase líquida. La oxidación de compuestos orgánicos ocurre cuando la solución acuosa se calienta a 300°C y 137 atm en presencia de aire comprimido. Este proceso se usa para tratar residuos con menos de 5% de orgánicos y con bajas concentraciones de pesticidas, azufre orgánico y cianuro, pero no se recomienda para orgánicos e inorgánicos halogenados o para altos volúmenes de residuos, no es adecuado este método para líquidos viscosos o sólidos.

- **Calderas industriales** .- Algunas calderas industriales pueden usar cantidades limitadas de residuos como combustible suplementario, de tal forma que los residuos son destruidos y además se recupera calor. Este método se limita solo a líquidos que pueden ser alimentados junto con el combustible principal o por separado. Se debe de limitar el contenido de cloro y azufre para minimizar la corrosión de los materiales de construcción de la caldera y además de evitar que se incrementen las emisiones de HCl y SOx. Este método puede ser ideal para tratar los residuos generados en el sitio (por ejemplo aceites lubricantes gastados) aunque se debe poner mucha atención a los materiales que son alimentados ya que una mala combustión podría generar productos muy agresivos a la salud humana.
- **Hornos industriales (Cemento, Cal, etc.)** .- Los hornos industriales son usados para incinerar los residuos recuperando energía. El sistema consiste de hornos rotatorios construidos de acero y recubiertos con tabique refractario. Estos hornos son en sí incineradores de hornos rotatorios y tienen mucho mayor tiempo de retención del material. El residuo líquido se alimenta mezclado con aire en el extremo caliente como suplemento del combustible principal (carbón, gas o combustóleo). Las temperaturas del horno están del orden de los 1,500-2,000 °C para hornos de cemento y cal. Los orgánicos se destruyen mientras que las cenizas son asimiladas en el producto del horno. El horno debe de tener un precipitador o una casa de bolsas para remover el material particulado de los gases de combustión. Se prefiere manejar líquidos aunque en algunos hornos se ha probado con éxito el manejo de residuos sólidos. Se debe de controlar el contenido de

cloro y azufre. Por otro lado la calidad del producto no se ve afectada. Este sistema debe de estar equipado con equipo anticontaminante.

- **Hornos de fundición (hierro y acero) .-** Las temperaturas de los hornos de fundición pueden alcanzar hasta 1,700 °C. El contenido de energía de los residuos se puede usar como combustible de complemento a los requerimientos del horno. El mineral de hierro se alimenta en la parte superior junto con el carbón y la caliza, mientras que el hierro fundido y la escoria se extraen en diferentes capas del fondo. El residuo se puede inyectar encima de la capa de escoria. La composición del residuo se debe controlar para evitar problemas de calidad del producto (hierro y acero). Es probable que la atmósfera reductora del los homo de fundición disminuyan la eficiencia de destrucción.
- **Incineración por infrarrojo.-** Las radiaciones se pueden usar como la fuente de calor en la destrucción de residuos peligrosos. Este sistema está compuesto de una cámara primaria que consiste de una caja rectangular de acero al carbón recubierta con capas de fibra cerámica ligera. La energía infrarroja se genera por calentamiento de una resistencia de carburo de silicio. El material a ser procesado se transporta a través del horno en una banda transportadora . Los sólidos son pirolizados en el centro. Se introduce además suficiente aire para quemar completamente los gases de salida. Cuando el residuo alcanza el final del horno, cae de la banda a una tolva. Las ventajas de este sistema incluyen una zona de combustión quieta, lo cual resulta en baja emisión de partículas, emisión reducida de contaminantes, bajo consumo de combustibles fósiles. Este sistema permite un alto grado de control y largos tiempos de residencia. Esta tecnología se utiliza principalmente para sólidos, lodos y suelos contaminados, pero se puede utilizar la inyección de líquidos y gases.
- **Combustor de lecho circulante .-** Este sistema está diseñado para mejorar los lechos fluidizados. El sistema opera a mayores velocidades y con sorbentes más finos que en los lechos fluidizados. Esto permite tener una unidad mas compacta y fácil de alimentar. También se genera una menor cantidad de emisiones y utilizan menos cantidad de sorbente. La clave de la alta eficiencia es la alta turbulencia que se logra con el combustor. Esta

característica permite eficientar la destrucción de todos los tipos de hidrocarburos halogenados incluyendo PCB's (bifenilos policlorados) y otros a temperaturas menores de 850°C. Los gases ácidos se capturan dentro de la cámara de combustión por cal en el lecho. Se necesita una casa de bolsas para control de partículas. El sistema es capaz de tratar sólidos, lodos, lechadas y líquidos. El alto grado de turbulencia y mezclado asegura tratamiento de una amplia gama de residuos. El residuo sin embargo debe de ser homogéneo en composición cuando se alimenta al combustor dado que sólo se introduce en un solo punto. Un beneficio adicional es la posibilidad de recuperación de calor.

CAPITULO 3

Principios generales de la incineración y del proceso de producción del cemento.

En el capítulo anterior se mencionaron los diversos métodos existentes para la tratamiento/disposición de residuos. Como se habrá observado, muchos tienen los inconvenientes de que se generan subproductos indeseables, requieren de tecnologías sofisticadas, instalaciones nuevas, regularmente costosas y complejas, además algunas de ellas no dan solución para la disposición final sino que son sólo etapas en las cuales se aísla el agente tóxico principal, requiriendo un tratamiento adicional, además del costo repercutido en su tratamiento/disposición.

Los procesos de destrucción térmica en general representan una buena alternativa para la disposición final de residuos, pero en especial los procesos de incineración ya sea convencional o en hornos de cemento ya que son tecnologías confiables y que son practicadas desde hace más de 20 años.

3.1 Principios generales de la incineración

La incineración es el proceso de oxidación rápida de un material dando como resultado la liberación de grandes cantidades de calor y la producción de una flama visible. La combustión es sin embargo un término convencionalmente utilizado en el área de combustibles fósiles para generación de energía. El concepto de incineración se utiliza más comúnmente cuando se refiere a destrucción térmica de residuos.

Es importante entender los fundamentos del proceso de combustión ya que es el punto de partida para diseñar efectivamente, operar y regular incineradores.

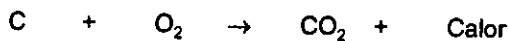
El material al que se refiere el término combustión puede ser tan simple como carbón puro en un caso ideal o algo tan complejo como un combustible convencional (petróleo, gas o cualquier otro hidrocarburo complejo) y en el caso de la incineración mezclas de hidrocarburos (aromáticos, alifáticos, soluciones

orgánicas etc.). Los productos de la oxidación dependerán de lo complejo del compuesto a incinerar.

Se puede hablar de 3 casos ejemplificados por la oxidación del carbón

Caso I

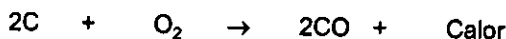
El caso más sencillo es la oxidación del carbón el cual al quemarse genera bióxido de carbono con la generación de calor:



Los combustibles y el oxígeno se combinan en cantidades estequiométricas. Una mezcla de combustible y oxígeno en las proporciones exactas para completar la combustión se le denomina mezcla perfecta (estequiométrica) y a su combustión se le llama combustión ideal.

Caso II

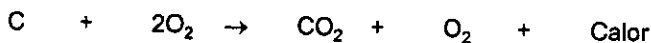
Si hay una cantidad mayor de combustible que de oxígeno la reacción resulta en una combustión incompleta y en lugar de tener como producto la reacción anterior, se tiene la siguiente reacción :



A esta reacción se le llama Incompleta, siendo la cantidad de calor producida menor que aquella de la combustión ideal.

Caso III

Cuando en una mezcla combustible se tiene un exceso de oxígeno, los productos de combustión después de la reacción se vuelven oxidantes (producen óxidos y películas sobre la superficies metálicas). En esta reacción la combustión es completa ya que todo el carbón es oxidado.



La cantidad de calor liberada es la misma que con la combustión perfecta excepto que en este caso la temperatura de flama es más baja y el calor disponible es menor. Todo se debe a que el exceso de oxígeno absorbe calor.

Estos tres casos nos indican que cualquier cambio en las condiciones ideales de operación de la incineración hace un proceso ineficiente en términos de energía o en destrucción. La incineración es un proceso complicado, algunos lo consideran más un arte que una ciencia, ya que se involucran diversos conceptos para poder entender el proceso que incluyen:

- *Balance de masa* .- Determina la cantidad de productos formados por los reactivos
- *Balance de energía* .- Determina la energía transformada en el sistema de combustión o cuánto combustible auxiliar se requiere para que incinerador alcance cierta temperatura.
- *Análisis termodinámico* .- Revela la información acerca de los cambios de los componentes químicos de un sistema de combustión. Sin embargo no revela que tan rápido ocurren estos cambios.
- *Análisis de cinética química* .- Provee información de que tan rápido ocurren los cambios.
- *Transferencia de calor* .- Determina la distribución de temperatura del sistema de combustión.
- *Turbulencia* .- Determina cuando los compuestos del residuo se ponen efectivamente en contacto con el oxígeno para la reacción.
- *Tiempo de residencia* .- Determina el tamaño volumétrico del combustor (Horno).

Los tres últimos elementos se les conocen como las tres T's de incineración de residuos.

Existen fundamentalmente cuatro elementos principales en sistema de incineración (Lee & Huffman ¹⁸, EPA, Nov 1990):

1. Combustible

El combustible es una mezcla de hidrocarburos que contienen enlaces ricos en energía como carbono-carbono y carbono-hidrógeno

2. Oxidante

El oxidante es la especie química que reacciona con el combustible o con el residuo durante la incineración. Su función es la de transformar la energía potencial almacenada en los combustibles o residuos en energía térmica o para convertir las moléculas pesadas de los residuos en compuestos simples y más ligeros como el CO_2 , H_2O y HCl . El oxidante más común es el oxígeno presente en el aire.

3. Diluyente

El diluyente es una sustancia que no participa químicamente en la reacción de combustión sino como un combustible u oxidante.

Existen varios diluyentes en el sistema de incineración :

- Nitrógeno
- El exceso de oxígeno
- El vapor de agua ya sea por el aire de combustión, o en la alimentación del residuo
- Pequeñas cantidades de cenizas, o metales pesados presentes en el residuo.

4. Residuo

El objetivo principal del sistema de incineración es destruir térmicamente residuos, este componente del sistema de incineración comprende residuos peligrosos, residuos municipales, sustancias tóxicas, sin embargo, algunos residuos son más eficientemente incinerados que otros. Las características del material a incinerar dictará el diseño del método de incineración, así como sus alcances y limitaciones.

3.2 Principios generales de la producción del cemento

Los conceptos fundamentales de combustión son aplicables al proceso de la producción del cemento ya que son procesos intensivos en el uso de la energía. Involucra el calentamiento de materias primas (principalmente caliza) a

aproximadamente 1300 °C para formar el "clinker", el cual se enfría, se muele y se mezcla con pequeñas cantidades de yeso y otros materiales para formar el cemento. El calentamiento ocurre en un reactor largo, recubierto interiormente de material refractario y cilíndrico (llamado horno) el cual gira a típicamente de 2-4 revoluciones por minuto y presenta una pequeña pendiente para asegurar el movimiento descendente del clinker ahí formado. Dependiendo del diseño, el calor es suministrado por la combustión de combustibles (gas, combustóleo o carbón) en la descarga del horno y en algunos casos se presenta una etapa adicional de combustión en la transición entre el precalentador y el horno y se conoce esto como un horno con precalcinador.

La producción del cemento requiere de tres componentes principales

- Calcio
- Silicio
- Hierro

El calcio es proporcionado por el carbonato de calcio (CaCO_3), el cual se encuentra contenido en la piedra caliza natural, además que este material es el que se utiliza en mayor proporción en la fabricación del "clinker".

El silicio se utiliza en forma de dióxido de silicio (SiO_2) y el hierro en forma de óxido de hierro (Fe_2O_3). Estos óxidos se utilizan en menor proporción y son obtenidos de minerales naturales como la Bauxita, arena, mineral de hierro o inclusive para el caso del óxido de hierro, utilizarse la escoria de los altos hornos de procesos metalúrgicos.

Las proporciones de los materiales dependen del tipo de cemento a ser producido, por ejemplo el cemento Portland requiere una relación caliza-barro de 3 a 1.

Después de que se mezclan y pulverizan las materias primas, se alimentan en el extremo del horno y se llevan a cabo las reacciones entre los materiales (principalmente descarbonatación del carbonato de calcio) y la llamada formación de la "fase líquida", en la cual a las altas temperaturas alcanzadas, la mayor parte del material se comporta como un líquido, logrando obtener así un medio en el cual el mezclado de los materiales sea favorecido.

El material semilíquido se condensa para formar el "clinker", éste regularmente es triturado y enfriado para obtener nódulos de entre 2 a 30 mm de diámetro. Posteriormente se agregan aditivos para obtener la calidad deseada del producto.

La composición del "clinker" se da tradicionalmente en base a los óxidos de los componentes elementales, los rangos de porcentajes aproximados se indican en la tabla 2.

Tabla 2
Composición del clinker del cemento Portland

Nombre Químico (Nombre común)	Formula Química (Notación)	Composición en el cemento Portland
Silicato de tricalcio (Alita)	Ca_3SiO_5 (C_3S)	50-70%
Silicato de dicalcio (Belita)	Ca_2SiO_4 (C_2S)	15-30%
Aluminato de tricalcio	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (C_3A)	5-10%
Tetracalcio aluminoferrita	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ (C_4AF)	5-15%

Dentro del horno se presentan cinco zonas térmicas, la localización y la longitud de estas zonas depende del proceso de manufacturación, tal como se indica en la tabla 3

Tabla 3
Zonas y rangos de temperaturas del material en el horno de cemento.

Zonas	Rango de temperatura del material (°C)
Secado y precalentado	15-805
Calcinado	805-1,200
Transición superior	1,200-1,400
Sinterizado (Zona de formación de clinker)	1,400-1,510
Enfriado (Transición inferior)	1,510-1,290

El cemento se puede producir mediante tres procesos:

- Proceso húmedo
- Proceso semiseco
- Proceso seco

En el proceso húmedo la alimentación al horno se mezcla con agua para promover la homogeneización de la mezcla. La lechada resultante (la cual contiene aproximadamente 30 a 40% de agua) se alimenta directamente al extremo inclinado del horno. La evaporación del agua proveniente de la alimentación, requiere que el horno tenga una zona del precalcinado y secado muy larga además de una sustancial inversión en energía. Esta es una tecnología que no es muy utilizada en la actualidad, aunque aún existen plantas antiguas que siguen operando con este sistema, principalmente en Europa, se indica en parte superior de la figura 2 un diagrama esquemático del proceso húmedo.

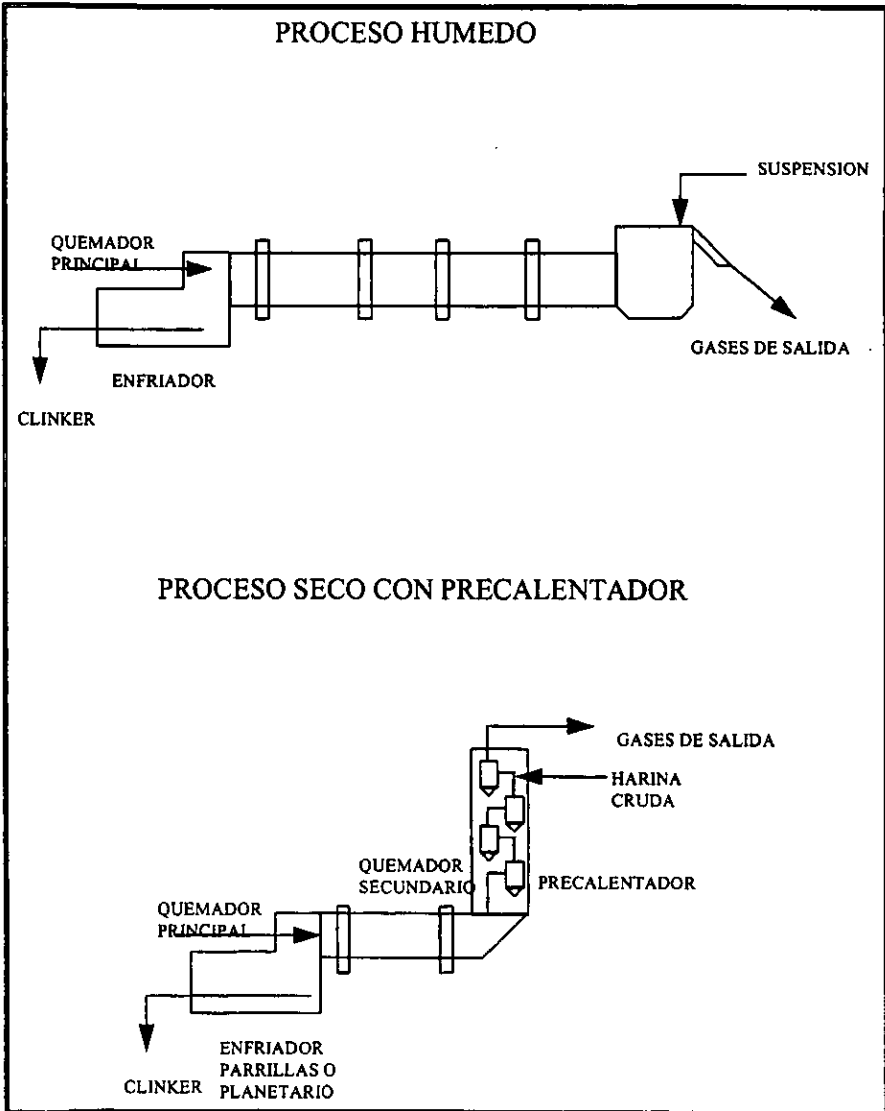
El proceso semiseco se conoce también como proceso Lepol. En este proceso, se agrega agua en una proporción del 10 al 15% al material de alimentación. Los pelets formados se cargan al sistema a contracorriente de los gases calientes de salida. Al tiempo que el material de alimentación entra al horno, el agua se evapora y la calcinación empieza. Este proceso es eficiente en energía ya que los gases de salida del horno, secan la alimentación la precalienta e inicia la precalcinación.

En el proceso en seco, la materia prima entra al horno en forma de polvo. Este proceso con precalcinador se hizo más popular a partir de la segunda guerra mundial. Se indica en la parte inferior de la figura 2 un diagrama esquemático del proceso seco.

Está equipado con una torre con ciclones intercambiadores de calor, en los cuales la alimentación seca se precalcina por medio de los gases de salida antes de entrar al horno. Algunos hornos están equipados con un ducto de by-pass debido a la formación de compuestos volátiles tales como sal de álcali en las etapas inferiores del precalcinador, dividiendo así parte de los gases de salida.

Los gases de salida del horno pasan a través de un equipo anticontaminante que puede ser colector de polvos de mangas o electrofiltro, para posteriormente ser enviados al ambiente.

Figura 2



Estos gases consisten principalmente de

- CO₂ producto de combustión y de descarbonatación.
- Agua producto de la combustión y evaporación
- Oxígeno debido al exceso de aire así como el de infiltraciones en el sistema.

Los polvos colectados del sistema anticontaminante, se reintegran a la corriente de "clinker".

El proceso seco en horno con precalcinador es de los más recientes avances tecnológicos. Dependiendo la presencia del precalcinador, el horno variará de longitud, es decir si se cuenta con precalcinador, la longitud de horno disminuirá y viceversa cuando no exista precalcinador.

Este no es un hecho fortuito ya que como se mencionó anteriormente, el proceso del cemento es altamente intensivo en energía, por tanto la industria del cemento está continuamente investigando tecnologías de producción más económicas. De esta misma forma se buscan alternativas en cuanto a combustibles se refiere.

Los diferentes diseños de los hornos responden a las necesidades de optimización del uso de la energía, en la tabla 4 se presenta un comparativo de requerimientos energéticos de diferentes tipos de hornos.

Tabla 4
Características de operación de hornos de cemento

Proceso	Consumo Especifico KJ/kg de "clinker"
Húmedo con horno largo	1400-1200
Seco con horno largo	950-1100
Seco con precalentador	860
Seco con precalcinador	750

CAPITULO 4

La degradación térmica de residuos peligrosos y sus productos

Como se indicó anteriormente, la descomposición térmica de residuos peligrosos en hornos de cemento presenta ventajas de tipo ambiental y económicas, en este capítulo se analizará con mayor detalle el proceso de degradación térmica en horno de cemento.

4.1 Propiedades de los materiales que pueden ser degradados térmicamente en los hornos de cemento.

Tal como se indica en el capítulo 1, la variedad de residuos peligrosos es muy grande, por tanto es importante enfocarse a los materiales que reúnen las características necesarias que los hagan susceptibles de ser destruidos térmicamente en un horno de cemento, ya que como se indica en el presente capítulo no todo material puede ser tratado con esta tecnología.

La disposición final de residuos peligrosos en hornos de cemento se practica a nivel comercial inclusive en México, de acuerdo a la experiencia en otros países en los cuales inclusive ya tienen desarrollada toda una normatividad al respecto, se han establecido criterios al respecto de las características que los residuos peligrosos deben de reunir a fin de asegurar que estos materiales tengan una disposición final segura y adecuada. A continuación se mencionan los más importantes.

4.1.1. Poder calorífico

Los residuos peligrosos que se recomienda para destruir térmicamente, deben ser combustibles y deben de tener un alto contenido de energía. Se recomienda que por lo menos tengan un contenido calorífico de 3,000 kcal/kg, como referencia el combustóleo disponible en México que normalmente se utiliza en los procesos productivos está del orden de 9,000 - 10,000 kcal/kg.

4.1.2. Corrosividad/Toxicidad

Dado que la función principal del residuo peligroso es reemplazar una porción del combustible convencional, la planta de cemento no debe quemar material corrosivo, reactivo o tóxico a no ser que sea un material con un alto contenido de calor. Los materiales muy corrosivos se evitan ya que podrían dañar el horno, tanque, tuberías y válvulas asociadas a la producción del cemento.

4.1.3. Contenido de cloro

También se evitan residuos con altos contenidos de cloro, ya que el HCl generado reacciona con los óxidos de potasio o sodio para formar sales de álcali, las cuales se volatilizan en la zona de combustión y se condensan en las partes más frías del horno, provocando de esta forma bloqueos en el sistema. Estos bloqueos provocan paros para mantenimiento en ductos por taponamiento, lo cual no es muy favorable ya que el proceso de cemento es continuo, además del riesgo que representa para la operación. Por esto se debe de monitorear continuamente el contenido de cloro en el material que se alimenta al horno.

4.1.4 Contenido de metales pesados

Un tercer parámetro a considerar es el contenido de metales. Aunque la mayoría de los metales se incorporan al cemento en los sólidos ya sea en el clinker o en los polvos recolectados en el sistema anticontaminante, se restringe el contenido ciertos metales en el residuo alimentado a 0.1%, más bien como criterio de calidad del producto final obtenido.

4.1.5 Contenido de Bifenilos policlorados (PCB's)

No es práctica común quemar bifenilos policlorados en hornos de cemento debido a tres factores principales:

- a) Alto contenido de cloro
- b) Por el riesgo inherente a este tipo de material ya que estos compuestos a pesar de que en un tiempo fueron ampliamente usados debido a su gran estabilidad térmica y otras propiedades dieléctricas, baja flamabilidad, alta capacidad calorífica, se ha determinado por la Agencia de Protección Ambiental de EUA que puede causar severos daños a la salud humana ya que causa efectos adversos en la reproducción, desarrolla toxicidad y tumores
- c) Existen tecnologías apropiadas y exclusivas para el tratamiento de residuos contaminados con PCB's, ya que se requieren temperaturas del orden de 1,200 °C tal y como se menciona en el capítulo 2 del presente trabajo.

En México aún no está disponible esta tecnología y por tanto los PCB's se tienen que exportar para destrucción

Para fines prácticos, se considera que un material no está contaminado si el contenido de contaminante se encuentra debajo de 50 partes por millón.

Una vez expuestas estas limitaciones, se infiere que sólo una parte del total de residuos peligrosos generados pueden ser destruidos térmicamente de una manera efectiva y segura en la industria del cemento, por ejemplo los solventes usados originados en las industrias de impresión, cosméticos, juguetes, inclusive residuos originados en la industria electrónica, asimismo los aceites gastados y en términos generales residuos combustibles con un alto contenido energético, bajo contenido de cloro y metales.

4.2 Productos de la destrucción térmica de residuos peligrosos en horno de cemento.

Ya que el objetivo de este método de disposición final de residuos peligrosos, es importante describir cual es el destino que tienen los compuestos o elementos contenidos que hacen que el residuo posea la característica de peligroso cuando pasan por el proceso de incineración.

De acuerdo a lo expuesto en el apartado 4.1, los residuos peligrosos usados como combustibles en los hornos de cemento serán en su mayoría materiales orgánicos, probablemente con humedad, cloro, azufre y metales. A continuación se describe a detalle cual es el destino de cada uno de estos materiales. (Mantus¹⁰, 1992)

4.2.1 Materiales orgánicos.

El material orgánico que compone al residuo peligroso se puede describir en términos de su composición elemental de carbón, hidrógeno, nitrógeno, azufre, oxígeno, halógenos y metales.

Bajo condiciones ideales de combustión, el carbón y el hidrógeno forman dióxido de carbono y agua, en tanto que el azufre y nitrógeno forman los respectivos óxidos (NO_x y SO_x). En el proceso de producción del cemento y en general en cualquier proceso de combustión industrial esto no es posible.

La mayor parte carbón contenido forma el dióxido de carbono, cuya generación es incrementada por la aportación de la calcinación de la piedra caliza. De esta forma parte de carbón es transformado en monóxido de carbono

El hidrógeno produce agua, cuya cantidad se verá incrementada por la evaporación del agua contenida en el mismo residuo, en el combustible convencional, la contenida en el aire de enfriamiento y combustión, así como la contenida en la materia prima para la producción del cemento.

De acuerdo al contenido de azufre y nitrógeno se forman los óxidos respectivos. Se generan también cantidades mínimas de monóxido de carbono, lo que nos indica que se trata de una combustión incompleta.

Esta situación nos lleva a que no todo el material orgánico se destruye, generándose pequeñas cantidades de lo que se conoce como productos de combustión incompleta

Estos productos son un grupo muy diverso de compuestos orgánicos que son formados debido a las múltiples reacciones que se llevan a cabo dentro del

homo por ejemplo pirólisis, ataque de radicales, etcétera. La discusión y análisis de cada uno de ellos plantearía un campo muy teórico el cual esta fuera del alcance del presente trabajo.

Asimismo se pone especial énfasis en la posible generación de dioxinas y furanos ya que éstos son compuestos muy tóxicos. Las dioxinas y furanos son subproductos de procesos de combustión y su formación se debe a diversos factores entre ellos la temperatura de operación y el precursor (principalmente compuestos organoclorados). La cantidad generada es muy baja (en el rango de partes por millón e inclusive se expresan en términos de nanogramos por metro cúbico), aunque una vez formados estos compuestos son muy estables.

4.2.2 Metales

Los compuestos metálicos que se alimentan al sistema cambian en su estructura durante el proceso de incineración, pero el elemento metálico no cambia ya que el metal no se destruye en el proceso.

Estos metales son alimentados con el mismo mineral que compone a la harina o crudo así como el contenido en los combustibles, incluyendo en éstos el residuo peligroso utilizado como combustible alterno.

Según criterios de la EPA, se deben de regular las concentraciones de la emisión de 10 metales, debido al potencial de causar severos efectos a la salud humana y al ambiente. Se clasifican en dos grupos:

- Carcinogénicos .- Arsénico, Berilio, Cadmio y Cromo hexavalente
- No carcinogénicos .- Antimonio, Bario, Plomo, Mercurio, Plata y Tallo.

Los puntos de salida donde se pueden identificar los metales son dos:

- En el "clinker"
- En el efluente de la chimenea de gases de salida.

Antes de que los gases sean enviados al ambiente pasan por un dispositivo anticontaminante, en el cual se colectan polvos siendo estos reintegrados al proceso.

Es muy difícil el determinar si el quemar residuos peligrosos en hornos de cemento pudiera incrementar el contenido de metales en el clinker ya que el mineral de alimentación que compone a la harina o crudo ya contiene metales en su composición original.

Lo que es un hecho es que resultados de pruebas indican que la mayor parte de los metales que se alimentan al sistema se retienen en los sólidos de proceso y finalmente se incorporan al "clinker".

Esta situación hace posible alimentar una corriente de residuos peligrosos con cierto contenido de metales, ya que el sistema permite incorporarlos a un volumen infinitamente mayor, además que de acuerdo a pruebas efectuadas al cemento, no se ve afectada la calidad del mismo.

Como resultado de estas pruebas se indica que no existe una diferencia apreciable en el contenido de metales en el cemento producto de procesos en los cuales se utiliza combustible convencional o residuo peligroso como combustible alterno.

4.2.3 Cloro.

Las emisiones de cloro se deben de regular debido a los efectos adversos que causa en altas concentraciones.

El cloro se encuentra contenido principalmente en la corriente de alimentación de residuo peligroso, sobre todo si está compuesta de solventes clorados. Estos materiales al quemarse se produce el gas HCl y pequeñas cantidades de gas cloro.

Este parámetro es indicativo también de la eficiencia con la cual se conduce el proceso de destrucción ya que es una medida indirecta del nivel de destrucción alcanzado por el horno.

Esto es particularmente importante durante la operación cotidiana del horno de cemento al ser alimentado con combustible alternativo previamente caracterizado en cuanto al contenido de cloro

Las emisiones de HCl/Cloro son parámetros que se siguen muy de cerca y en caso de que disminuyan estos valores bajo condiciones normales de operación (es decir que no se varíe el flujo de alimentación ni el contenido de cloro en el residuo peligroso) sería un indicio de que existen problemas en el proceso de incineración ya que no todo el material clorado se estaría destruyendo.

4.3 El horno de cemento como medio de destrucción de residuos.

Una vez que se han definido con mayor precisión el tipo de materiales que pueden ser tratados térmicamente en los hornos, a continuación se expondrán las características que hacen al horno de cemento un excelente medio de destrucción.

4.3.1. Altas temperaturas y largo tiempo de residencia.

Para asegurar la destrucción de compuestos orgánicos por incineración, se han desarrollado criterios de combustión para compuestos halogenados y no halogenados. La temperatura y el tiempo de residencia requeridos en una cámara de combustión y así como la concentración de oxígeno requerida en los gases de salida para asegurar la destrucción de ambos tipos de compuestos se indican en la tabla 5.

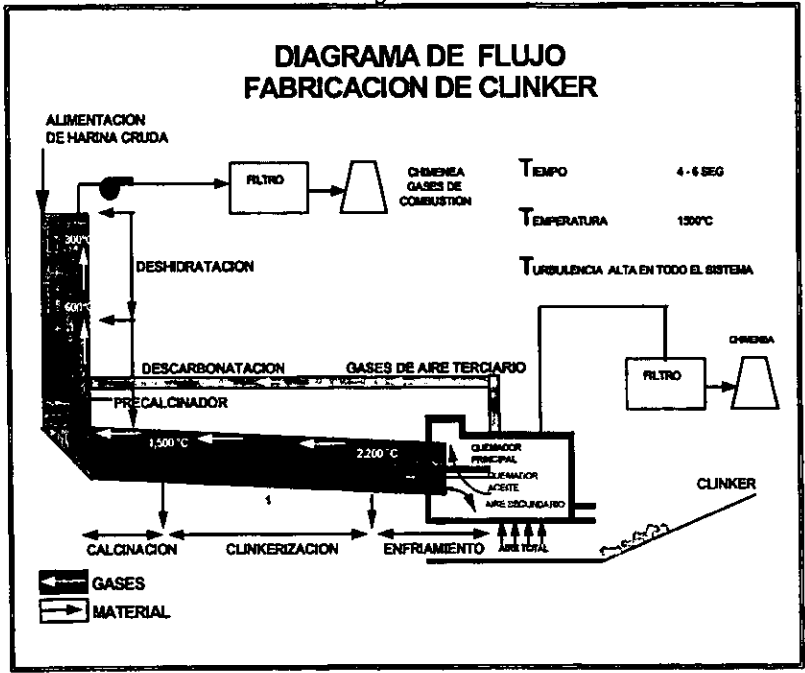
Tabla 5
Criterios de combustión

Clasificación del residuo	Temperatura °C	Tiempo de residencia (seg.) (En la cámara de combustión)	Concentración de oxígeno (%) (En la salida de la cámara de combustión)
No halogenado	1,000	2	2
Halogenado	1,200	2	3
PCB's	1,200	2	3

En un horno de cemento, el gas permanece aproximadamente 3 segundos a temperaturas mayores o iguales a 1,200 °C. Estas condiciones exceden los requerimientos para la destrucción de compuestos halogenados y no halogenados, e inclusive exceden las condiciones de operación de un incinerador de residuos peligrosos, (Mantus¹⁰, 1992) estas condiciones se indican en la figura 3.

El proceso de producción de cemento se efectúa en un horno, el cual debe ser operado a altas temperaturas. Para producir "clinker", el material dentro del horno requiere temperaturas de aproximadamente 1,500 °C. Para alcanzar estas temperaturas, se requiere de una temperatura de flama de por lo menos 1,900 °C. Por tanto los hornos cementeros operan a las condiciones ideales para la destrucción de compuestos orgánicos, debido a que estas condiciones son esenciales para la producción del cemento.

Figura 3



4.3.2. Medio alcalino

Uno de los problemas con la incineración convencional es que debido a la combustión se generan gases ácidos (HCl). Por tanto los incineradores requieren de etapas de lavado en los cuales se utilizan compuestos alcalinos, tales como el hidróxido de sodio o la cal para la neutralización de esos gases.

Los hornos de cemento no poseen lavadores de gases debido a que el ambiente es alcalino, ya que como se mencionó anteriormente, uno de los pasos para la producción del cemento es la calcinación del carbonato de calcio para producir cal, el cual es el mismo material utilizado en los lavadores de gases de los incineradores. Otros compuestos alcalinos presentes en el proceso es el óxido de magnesio. Por tanto los gases ácidos que atraviesan desde la zona de quemado hasta las zonas de calcinado y secado se neutralizan por el material alcalino del horno.

4.3.3. Minimización del residuo generado.

Uno de los inconvenientes de los sistemas de incineración convencional es la generación de cenizas, la cual es capturada por los sistemas anticontaminantes (casa de bolsas o electrofiltro). De acuerdo con los criterios de la Agencia de Protección Ambiental de EUA, este es por naturaleza otro residuo peligroso, en gran parte por los altos contenidos de metales pesados presentes.

En el proceso del cemento este inconveniente no se presenta ya que este material se recicla a la corriente del cemento, en gran parte esta práctica se realiza para minimizar las pérdidas de materia prima y evitar emisiones a la atmósfera, posteriormente se analizará con mayor detalle la naturaleza de los polvos colectados así como su destino final dentro del proceso.

4.3.4 Estabilidad térmica

En vista de que el horno de cemento es una unidad muy grande de producción con una alta capacidad calorífica, no es posible un cambio de temperatura en un período corto de tiempo, pero de cualquier forma debido al sistema de control, en caso de que ocurriera algún evento que afectara las condiciones de

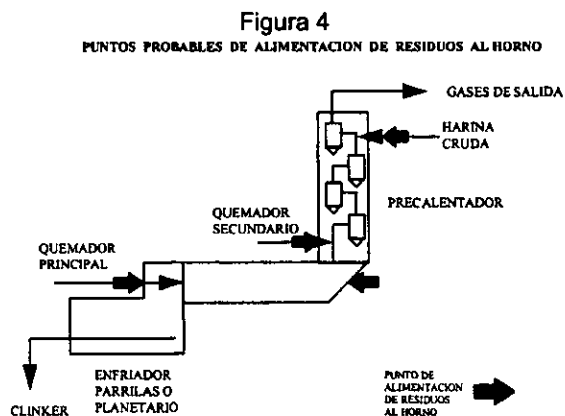
operación normales, se instalan equipos de bloqueo automático que cortan la alimentación al sistema.

4.4 La destrucción térmica en hornos de cemento como alternativa viable.

Las operaciones de destrucción de residuos en hornos de cemento como ya se ha mencionado anteriormente no es nueva, pero desde la concepción de los procesos de producción de cemento no se había visto el potencial sino hasta que la generación de residuos presentó un gran problema hacia la sociedad, por lo cual se tuvo que buscar una forma segura de destrucción de los mismos. (Kim Irene ⁹, Chem Eng 1994)

4.4.1 Flexibilidad de manejo de materiales

Dentro de las características operativas que ofrece la instalación de la planta de cemento es que ésta presenta una gran flexibilidad en cuanto al tipo de residuos a alimentar al horno ya que de acuerdo a la experiencia con al manejo de residuos en hornos de cemento, se pueden alimentar distintos tipos de materiales de acuerdo a las características fisicoquímicas que presenten. El diseño del sistema de alimentación dependerá de los aspectos técnico-económicos pero en términos generales los residuos se pueden alimentar principalmente por 4 posibles sitios, tal como se indica en la figura 4



4.4.2 Control estricto de emisiones por diseño

La destrucción de residuos en hornos de cemento es segura desde el punto de vista de que las sustancias tóxicas que contienen los residuos alimentados al horno no se liberan al ambiente sino que se transforman en compuestos menos agresivos, además que deben de pasar por una serie de etapas que aseguran que no se emitan altos niveles de sustancias tóxicas.

Primera etapa.- Alta temperatura de incineración (se alcanzan temperaturas de flama de 1800-2000 °C)

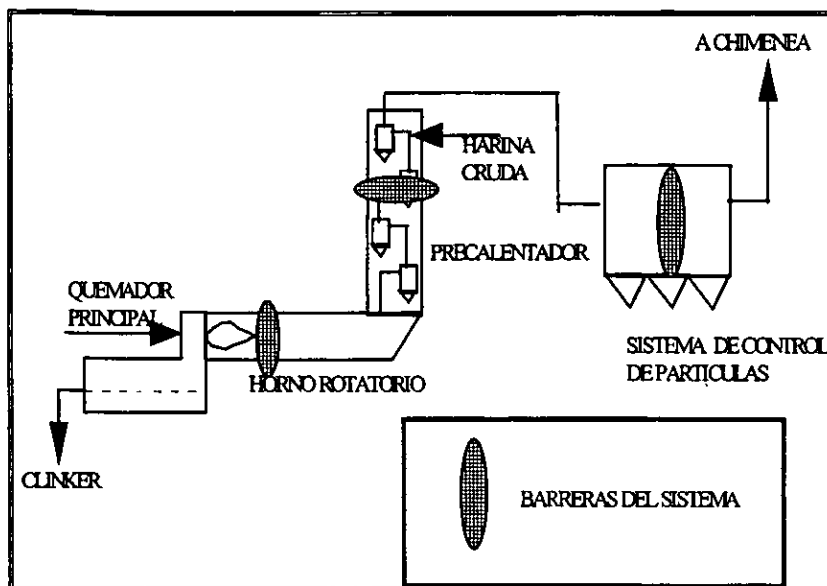
Segunda etapa.- Contacto con harina cruda fina y dispersa que provoca una purificación de gases a través de la absorción de compuestos tóxicos. Esta absorción se lleva a cabo en el precalentamiento y en el secado y trituración de la harina cruda

Tercera etapa.- Equipo de control de emisiones muy eficiente como lo es el Electrofiltro o Casa de Bolsas. La corriente de gases debe de pasar por este sistema antes de enviarse a la atmósfera. Los polvos finos colectados se reintegran al proceso.

Los residuos peligrosos que se alimentan al horno necesariamente tendrán que pasar por estas tres etapas y representan barreras muy efectivas para el control de emisiones, adicionalmente los procesos de producción de cemento que se encuentran instalados en el país cuentan con estas etapas o barreras que permiten asegurar que existen la infraestructura adecuada para la destrucción de residuos.

Estas etapas o barreras se ilustran en la figura 5.

Figura 5
Etapas del horno de cemento para control de emisiones



4.4.3 Infraestructura ya existente

Esta alternativa presenta la particularidad de que ya se cuenta con la infraestructura básica para la destrucción térmica, ya que el rubro más importante es obviamente el correspondiente al horno.

Si se compara esto con la alternativa de instalar un incinerador comercial, se debe de tomar en cuenta que este último tendría que ser nuevo y de acuerdo al volumen generado en el país, se tendrían que instalar no solo uno sino varios incineradores de capacidad elevada distribuidos en todo el país.

Los hornos de cemento presentan adicionalmente una gran ventaja, la industria cementera se encuentra estratégicamente distribuida en el territorio nacional, esto involucraría utilizar las instalaciones más cercanas a los sitios de generación, minimizando con esto el riesgo inherente al transportar residuos peligrosos.

Se indica en la figura 6 la distribución de las plantas cementeras en el país.

Figura 6

Distribución de la industria cementera en el país



CAPITULO 5

CASOS PRACTICOS DE DESTRUCCION TERMICA DE RESIDUOS EN HORNOS CEMENTEROS.

Dado que la incorporación de materiales residuales a los hornos cementeros presenta un grado de avance tal, es importante mostrar casos concretos de aplicación de esta tecnología así como los detalles más importantes que se presentan alrededor, ya que si bien el principio general es relativamente simple, se deben cuidar muchos detalles en la parte de control de los materiales, así como en la operación de los hornos que se utilizan para la destrucción térmica.

Como antecedente es importante mencionar la magnitud de la industria cementera mundial, en 1995 se produjeron alrededor de 1,420 millones de toneladas que se distribuyeron en la forma indicada en la tabla 6.

Tabla 6
Producción mundial de cemento en 1995

Región/País	Porcentaje
China	30
Resto de Asia	23
Japón	7
Europa	18
América	13
Africa	4
Rusia y Repúblicas ex-Soviética	4
Oceanía	1
Total	100

Se aprecia que los sectores más importantes se encuentran ubicados en Asia, Europa y América que en conjunto abarcan el 91% del mercado. En las dos últimas regiones se han presentado en la última década, una fuerte dinámica en lo que se refiere a la incorporación de residuos a los procesos productivos del cemento.

Dado que existe una mayor difusión de los avances en este campo en Europa y América, se presenta a continuación un panorama general del estado que

guarda la destrucción térmica de residuos en algunas instalaciones Europeas y de Estados Unidos.

En Europa existen alrededor de 300 plantas cementeras y en los últimos 20 años ha reducido su consumo específico de energía hasta en un 30% , lo cual equivale a 11 millones de toneladas de carbón por año.

Actualmente cerca del 78% de la producción Europea de cemento es vía procesos secos, 16% a partir de procesos semihúmedos y sólo el 6% proviene de procesos húmedos

El uso de residuos como combustibles alternativos en la industria cementera Europea es una tecnología probada y bien establecida desde más de una década, en 1995 aproximadamente el 10% del consumo de energía se originó de combustibles alternos a base de residuos , cuyo valor es el equivalente a 2.5 millones de toneladas de carbón cada año, en algunas regiones se alcanzan hasta 50% del consumo de energía.

A efecto de ilustrar con mayor precisión la solución que ofrece esta tecnología para la destrucción de residuos, se describen a continuación algunos casos de aplicación.

A) Caso práctico de la incorporación de residuos en Austria.

Austria tiene un población de alrededor de 7.5 millones de habitantes , los cuales generan entre otros residuos aproximadamente 45,000 toneladas de llantas usadas cada año (Gerger¹⁵, 1991).

Se encuentran instaladas en su territorio 6 plantas cementeras que dada su lejanía a fuentes de abasto de combustibles, ocasionan que estos alcancen precios elevados.

En vista que la generación de llantas usadas representaba un problema grave en cuanto a que se carecía de áreas adecuadas para su disposición final y el potencial que ofrecía como combustible en las plantas de cemento, la industria cementera local, sometió al Gobierno Austríaco una propuesta para efectuar las

pruebas de quemado y así determinar si éstas se podrían incorporar al proceso del cemento guardando las siguientes premisas:

- a) Evitar dañar la salud humana así como ocasionar efectos adversos al ambiente
- b) Mantener una calidad constante del cemento producido

Toda vez que se realizaron las pruebas y en base a los resultados se determinó que las emisiones generadas no eran muy distintas a las que se presentan en la operación con combustible convencional y por otro lado la calidad del cemento era consistente con los estándares de calidad establecidos.

De tal forma desde hace más de una década se ha hecho práctica común la destrucción térmica de llantas de tal forma que la industria cementera austríaca actualmente destruye térmicamente 35,000 toneladas por año en las seis plantas y por tanto alcanza una disposición segura del 80% de las llantas generadas en este país.

Existe el caso específico de la planta de Gmunden Hans Hatschek AG, la cual después de 10 años ha logrado la incorporación de hasta el 50% de residuos en sustitución del combustible convencional y está compuesto de 30% de residuos peligrosos líquidos (principalmente aceite lubricante gastado) y 20% de llantas de desecho. (5,000 tons/año y 8,000 tons /año respectivamente).

Este es un caso muy ilustrativo que sirve para mostrar todos los aspectos que se ven involucrados antes de que la destrucción térmica de residuos en hornos cementeros pase a ser una actividad cotidiana.

La comunidad de Gmunden, es un pueblo con actividades eminentemente turísticas ya que ofrece áreas de descanso, lo cual hace que la región se vuelva muy sensible a cualquier tipo de contaminación ambiental

En 1980 la planta inició un programa piloto para el quemado de llantas de desecho. Los resultados mostraron que la mejor forma de incorporar las llantas usadas era alimentarlas ya trituradas ya que con esto se lograba una mejor combustión de las mismas.

Con esta acción se logró resolver el problema de la destrucción de llantas usadas de una forma amigable con el ambiente, al grado que en 1982, la compañía recibió el Premio a la Protección del Ambiente que otorga el gobierno Austríaco.

Con este antecedente y dados los excelentes resultados obtenidos, así como la aceptación de la comunidad, la compañía decidió ampliar sus actividades hacia los residuos combustibles líquidos.

De esta forma en 1987 se proyectó sustituir aproximadamente 20% del combustible utilizando residuos líquidos y así fue como se elaboró un el trabajo técnico preliminar que incluyó una consulta con expertos locales y foráneos y toda vez que fue concluido el proyecto, este se sometió a aprobación al gobierno austríaco.

Después de una consulta pública tanto con residentes, como con representantes del gobierno, el proyecto fue aprobado para realizarse en 1987.

Dado que los resultados de las pruebas fueron favorables en lo que se refiere a emisiones, la empresa decidió invertir en una instalación para el manejo de los residuos.

Posteriormente al arranque de la instalación, grupos ecologistas impugnaron la autorización y debido a la presión generada, la autoridad locales decidió revocar el permiso que se había concedido a la empresa.

La compañía a su vez decidió hacer una campaña de difusión más generalizada hacia la comunidad para dar a conocer las bondades de la destrucción controlada de residuos en el horno cementero. Asimismo se realizaron discusiones con los residentes y se encontró que en muchos de los casos se presentaron malentendidos debido a la falta de objetividad en la información que había sido difundida inicialmente y con ello se propició un clima de alarma y sentimiento de inseguridad por parte de la comunidad.

El caso pasó a instancias gubernamentales superiores y fue de esta forma que se creó una comisión integrada por representantes de la comunidad, de grupos ecologistas, de la empresa y del gobierno local para supervisar un nuevo periodo de pruebas con parámetros de medición más estrictas y completas en cuanto a los parámetros a monitorear durante las mismas.

Finalmente, estas investigaciones mostraron que el uso de residuos líquidos no presentó influencias detectables en los niveles de emisión del horno cementero.

El proyecto fue apoyado por los expertos con la condición de que se mantuvieran las condiciones de monitoreo y con estas bases la comisión alcanzó el consenso y consecuentemente se extendió un permiso definitivo para la incorporación de residuos al horno cementero.

La planta de Gmunden tiene aprobado la incorporación de residuos líquidos de acuerdo a la norma Austríaca cuya clasificación se indica en la tabla 7

Tabla 7

Tipos de residuos autorizados para su reciclaje en la planta de Gmunden

Residuos de aceites minerales y sintéticos
Residuos de emulsiones y mezclas de productos de aceites minerales
Lodos de aceites minerales
Residuos de aceites minerales de refinería
Residuos de mezclas de solventes y de solventes orgánicos libres de halógenos
Residuos de colorantes, pinturas y barnices

En adición a estas especificaciones con respecto a los materiales, las autoridades especifican límites para el contenido de poder calorífico, tasa de alimentación y cantidad total de PCB's (bifenilos policlorados) para la aceptación de residuos líquidos.

Los límites que se han impuesto a los residuos líquidos se indican en la tabla 8.

Tabla 8
Límites de aceptación de contaminantes para residuos líquidos para la planta de Gmunden.

Parámetro	Concentración límite
PCB	<80 ppm
Pb	<5000 ppm
Hg	<2 ppm
Tl	<10 ppm
Cd	<60 ppm,
F	<600 ppm
S	<5 %
Cl	1%
N	<5%

Cabe mencionar que para la incorporación de residuos al proceso producción del cemento, se tienen habilitados controles que permiten realizar esta actividad de la manera más segura ya que antes de que sea recibido cualquier material se analizan para asegurar que cumple las especificaciones requeridas y por otro lado las instalaciones se diseñaron considerando factores de seguridad.

B) Experiencia de la incorporación de residuos en el Reino Unido

A continuación se presenta el caso de la compañía Castle Cement's Ketton la cual es la compañía más grande del Reino Unido con una producción anual de 1.3 millones de toneladas. Cuenta con dos hornos con proceso seco y cuatro etapas del precalentador, en esta planta se tiene el precedente de que se ha operado conjuntamente con cinco diferentes combustibles: dos tipos a base de residuos, carbón, petcoke y gasóleo.

Castle Cement abastece el 25% de la demanda de cemento del Reino Unido y en 1990 condujo pruebas para la incorporación de materiales residuales de las industrias de pinturas, tintas, químicos, petróleo, automotriz, plásticos y farmacéutica.

Los límites que se han impuesto a los residuos líquidos se indican en la tabla 8.

Tabla 8
Límites de aceptación de contaminantes para residuos líquidos para la planta de Gmunden.

Parámetro	Concentración límite
PCB	<80 ppm
Pb	<5000 ppm
Hg	<2 ppm
Tl	<10 ppm
Cd	<60 ppm,
F	<600 ppm
S	<5 %
Cl	1%
N	<5%

Cabe mencionar que para la incorporación de residuos al proceso producción del cemento, se tienen habilitados controles que permiten realizar esta actividad de la manera más segura ya que antes de que sea recibido cualquier material se analizan para asegurar que cumple las especificaciones requeridas y por otro lado las instalaciones se diseñaron considerando factores de seguridad.

B) Experiencia de la incorporación de residuos en el Reino Unido

A continuación se presenta el caso de la compañía Castle Cement's Ketton la cual es la compañía más grande del Reino Unido con una producción anual de 1.3 millones de toneladas. Cuenta con dos hornos con proceso seco y cuatro etapas del precalentador, en esta planta se tiene el precedente de que se ha operado conjuntamente con cinco diferentes combustibles: dos tipos a base de residuos, carbón, petcoke y gasóleo.

Castle Cement abastece el 25% de la demanda de cemento del Reino Unido y en 1990 condujo pruebas para la incorporación de materiales residuales de las industrias de pinturas, tintas, químicos, petróleo, automotriz, plásticos y farmacéutica.

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

Se mostró que con las medidas más estrictas de control y análisis estas corrientes de materiales podrían reemplazar el carbón utilizado como combustible en el horno sin detrimento de la calidad del ambiente y del cemento.

Durante las pruebas , se logró reemplazar hasta un 50% del combustible convencional, sin mostrar cambios significantes en la emisión.

Adicionalmente a la exitosa incorporación de residuos líquidos, y dado que es recurrente el problema de la generación de llantas en la mayoría de los países industrializados, se iniciaron gestiones para la incorporación de llantas usadas al proceso del cemento.

Se estima que se generan aproximadamente 30 millones de llantas usadas en el Reino Unido y una gran proporción se envía a relleno sanitario, pero existe una propuesta en la Unión Europea que impediría que las llantas se dispusieran de esta forma.

En 1996 la compañía solicitó otro permiso para la incorporación de llantas usadas al proceso de fabricación del cemento conjuntamente con la operación a base de residuos líquidos, los términos de esta solicitud establecían hasta un 30% de sustitución de residuos líquidos en ambos hornos, así como la introducción de llanta entera para reemplazar hasta un 30% de combustible.

Como conclusión a este caso se tiene que puede operar a un nivel de sustitución de 55% con nuevos combustibles en un proceso estable con excelente calidad de clinker, adicionalmente se racionaliza el uso de rellenos sanitarios.

C) Experiencias en México.

Tal como se mencionó en el capítulo 1 de presente trabajo, los principales grupos cementeros en México han realizado pruebas en las cuales se han incorporado diversos materiales residuales.

Actualmente es una práctica común la utilización de residuos tales como llantas usadas y aceites gastados, aunque para realizar esta actividad ha sido determinante la ejecución de protocolos de pruebas de quemado, en cuyo planteamiento se involucran aspectos de orden técnico, legal y de seguridad.

En estos protocolos de prueba se determinan las emisiones del proceso cementero bajo dos condiciones, una bajo operación normal y otra incorporando algún material residual (EPA¹⁴, 1992) , .

Asimismo se analizan los residuos previos a su incorporación con la finalidad de controlar el contenido de diversos contaminantes tales como el cloro, metales pesados, PCB's, etc

En cuanto a emisiones se analizan los gases de combustión, tales como CO, CO₂,NOx, SOx, Hidrocarburos Totales, polvo, humedad principalmente y eventualmente Dioxinas y Furanos.

Antes de efectuar un protocolo de pruebas las empresas cementeras deben ser contar con la aprobación de las autoridades ambientales, de tal forma que establezcan condiciones tanto de sustitución así como de características de los residuos que se alimentarán al proceso.

Estas condiciones fijadas por la autoridad regularmente son complementadas con los correspondientes estudios en materia de impacto y riesgo ambiental, asegurando con ello que la empresa cuente con la debida preparación y sobre todo que el lugar en donde se desarrolle la actividad no cause un deterioro adicional a las condiciones del entorno.

Se tienen antecedentes de protocolos de prueba de quemado desde 1994, en las cuales se utilizaron principalmente aceites gastados.

Dado los resultados que se han reportado a las autoridades, se tienen referencias que se han emitido diversas autorizaciones a los grupos cementeros, mediante las cuales se permite alcanzar niveles de sustitución en términos calóricos de 30%, aunque esto está condicionado a que las empresas cuenten con un sistema de monitoreo continuo y asimismo se cumplan con una serie de especificaciones del residuo tanto líquido como sólido, tal como se establece en la tablas 8.

Tabla 8

Límites máximos permisibles de emisión de los hornos cementeros

Parámetro	Límite (mg/m ³)
Partículas	80
SO ₂	1100
HCl	70
Hidrocarburos Totales	70
Nox	705
CO	5750
Metales pesados Cd, As, Co, Se, Ni, Mn, Sn, Pb, Cr, Cu, Zn	No se tiene límite, pero se deben hacer dos evaluaciones de las emisiones al año

Como se mencionó estos parámetros se monitorean continuamente utilizando diversos sistemas de medición ya sea extractivos u ópticos y tienen la ventaja de que ofrecen lectura en tiempo real, a efecto de ver oportunamente el desempeño del proceso.

Si bien es importante conocer este desempeño, lo es mas aún el conocer la calidad de los residuos que se estén incorporando al proceso, por ello es importante también controlar las condiciones de estos residuos y es por ello que también se analizan antes de su incorporación al horno estos residuos .

De esta forma, las empresas que formulan combustibles alterno cuentan con las especificaciones indicadas en la Tabla 9

Tabla 9

Especificaciones de los residuos a incorporar en los hornos (los cuales pueden ser mezclas de residuos a base de aceites y solventes)

Parámetro	Límite
Poder calorífico	4995 Kcal/kg
PH	2-12 unidades de pH
Cloruros	<2%
Sulfuros	<3%
Cromo	3,000 mg/lt
Plomo	4,000 mg/lt
Arsénico	100 mg/lt
Mercurio	50 mg/lt
Plata	100 mg/lt
Selenio	100 mg/lt
Cadmio	500 mg/lt
Bario	6,000 mg/lt
H ₂ O	< 20%
PCB's	50 mg/lt

Manteniendo las mezclas de residuos en estos niveles, es posible mantener una operación continua que puede permitir alcanzar valores exitosos de procesamiento del orden de 1'000,000 de litros por mes.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

La enorme generación de residuos peligrosos en México requiere de soluciones integrales y planes muy ambiciosos para dar respuesta al grave deterioro que causa un manejo inadecuado de los residuos, las tecnologías actualmente disponibles en México son muy limitadas ya que no se cuenta con la capacidad de respuesta necesaria, aunque se desprende que la infraestructura actual en lo referente al manejo de residuos peligrosos cubre parcialmente las necesidades que se presentan para no deteriorar el medio ambiente.

Así como se presentan tecnologías simples y económicas, también existen tecnologías sofisticadas y por lo general poco accesibles tanto económica o técnicamente, ya que inclusive algunas se encuentran en etapas de investigación.

De acuerdo a lo mencionado en las secciones anteriores, se desprende que la destrucción térmica de residuos peligrosos es una alternativa viable para el grave problema de la generación de residuos que se presenta actualmente, ya que se pueden destruir de una forma segura un amplio rango de materiales.

Ofrece grandes ventajas en cuanto a que se puede utilizar una infraestructura ya existente, como lo es la planta cementera, la cual sólo requiere de una inversión menor comparada con la correspondiente a toda la planta cementera para la habilitación de la instalaciones adecuadas para el manejo de residuos en planta.

La industria cementera se encuentra perfectamente distribuida en el territorio nacional, por tanto se puede utilizar todo ese potencial para atacar parcialmente la generación desde los mismos lugares donde se generan, aunque difícilmente sería la única solución aún contando con todas las plantas a plena capacidad

Es importante mencionar que no todas las instalaciones de las plantas cementeras podrían ser susceptibles de dar el servicio de destrucción térmica

sobre todo en los casos que no se garantice por parte de la cementera un manejo responsable y adecuado de los residuos que se pudieran recibir en planta, ya que se podría causar un efecto adverso al ambiente.

Esta tecnología presenta limitaciones principalmente desde el punto de vista de social, ya que a debido al desconocimiento de la población en general estas prácticas no son muy aceptadas, aunque esté demostrada la efectividad que ofrece este método para la destrucción de residuos. Cabe mencionar que se tienen documentadas instalaciones en otros países que utilizan elevados porcentajes de material residual en sus hornos cementeros, sin presentar problemas de calidad, seguridad y emisiones.

Se debe de observar a esta tecnología no como la única solución sino necesariamente como complemento con otras para poder dar oportunidad a que se den las condiciones para la implementación de mejoras tecnológicas así como programas para la minimización en la generación de residuos desde la misma fuente y lograr optimizar en el aspecto de seguridad a las instalaciones ya existentes y con ello lograr atenuar el deterioro ambiental.

BIBLIOGRAFIA

1. Asociación Nacional de la Industria Química. Notas de la Primera Convención de Medio Ambiente. Octubre 1994.
2. Cortinas Nava Cristina. "La situación de los residuos peligrosos en México", *Ecología Industrial*, Ene/Feb, 1997.
3. Da Silva J.R., Dos Santos L.F., Nebra S.A., "Emission and control pollutants in cement industry". Third International Conference on Waste Management in the Chemical and Petrochemical Industries.
4. Fabian H.W., Reher P., Schoen M. "How Bayer incinerates wastes", *Hydrocarbon processing*. April 1979.
5. Hanke. J. "Mexican cement kilns and hazardous wastes". *E.I Digest*. February 1994.
6. Instituto Nacional de Ecología, Notas del Seminario sobre procesos térmicos para tratamiento de residuos. Cd. de México. Mayo de 1995.
7. Instituto Nacional de Ecología. Programa para la minimización y manejo integral de residuos industriales peligrosos en México 1996-2000. Septiembre 1996.
8. Instituto Nacional de Ecología, Relación de empresas autorizadas para el manejo de residuos peligrosos. Marzo de 1997.
9. Kim Irene. "Incinerators and cement kilns face off", *Chemical Engineering* April 1994.
10. Mantus Ellen K, Kelly Kathryn E. Pascoe Gary A. All fired up. *Environmental Toxicology International Inc.*
11. Noriega S. E. "Principios de incineración" *Revista de la Asociación Mexicana de Higiene y Seguridad A.C.* Julio de 1995.
12. Prokopy Steven. "Gathering support for burning tires", *Rock products cement edition*, March 1995.
13. SEMARNAP. *Ley General de Equilibrio y Protección al Ambiente*. 1a. Ed. Enero 1997.
14. U.S Environmental Protection Agency. *Handbook of Treatment technologies for hazardous wastes*. 1992
15. W. Gerger und P Liebl. "Thermal utilization of secondary fuels at the Gmunder Zementwerke Hans Hastshcek AG". *ZKG-Cement-Lime-Gypsum International*. 1991 No 11.