



69
reg.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

El reuso de residuos peligrosos líquidos como combustible alternativo en hornos para la fabricación del cemento

TESIS MANCOMUNADA
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERA QUIMICA PRESENTAN:

CRISTINA HUESCA BARNETCHE
VERONICA NAVA BORRAYO

MEXICO, D.F. 1995

FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO SEGÚN EL TEMA:

Presidente	PROF. EDUARDO ROJO Y DE REGIL
Vocal	PROF. JOSÉ FRANCISCO GUERRA RECASENS
Secretario	PROF. RODOLFO TORRES BARRERA
1er Suplente	PROF. EDUARDO MARAMBIO DENNETT
2do Suplente	PROF. RAMÓN EDGAR DOMÍNGUEZ BETANCOURT

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

SERVICIOS PROFESIONALES EN CONTROL DE CONTAMINANTES, S.A DE C.V.
Mitla #221 Col. Narvarte México D.F.
BIBLIOTECA DE LA FACULTAD DE QUÍMICA
Ciudad Universitaria

ASESOR:



ING. RODOLFO TORRES BARRERA

SUPERVISOR TÉCNICO:

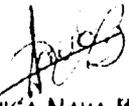


ING. JORGE CASERO GORDON

SUSTENTANTES:



CRISTINA HUESCA BARNETCHE



VERÓNICA NAVA BORRAYO

Agradecemos:

*A la Universidad Nacional Autónoma de México
y muy en especial a la Facultad de Química:*

*Por acogernos y compartir con
nosotras su inmensa sabiduría.*

A Jorge e Isela:

*Por el entusiasmo, dedicación y
paciencia que nos brindaron durante la
realización de este trabajo.*

Al Ing. Rodolfo Torres Barrera:

*Por el apoyo e interés demostrado
para la culminación de esta tesis.*

A nuestros maestros:

*Por su valiosa contribución en
nuestro desarrollo profesional.*

A los Huesca, Nava y Villalobos:

*Por cuidarnos y apoyarnos
incondicionalmente.*

A la generación de IQ-90:

*Por todos los gratos momentos
compartidos con ustedes.*

*CRIS Y VERO**

A Dios:

*Por el amor, la fe
y esperanza de cada día.*

A Carmen:

*Porque tu recuerdo y tu esencia
siempre vivirán en mí,
prolongados en mis ecos.
Te quiero y te extraño.*

A mis Padres:

*Con inmenso cariño y agradecimiento.
Por ser fuente inagotable de amor,
ejemplo de fortaleza y entrega.
Porque son lo más valioso que tengo.
Los adoro*

A Lety y Yola:

*Por ser amigas y maestras,
por el apoyo incondicional.
Por la nobleza de la hermandad
Las quiero tanto...*

GRACIAS

Agradecemos:

*A la Universidad Nacional Autónoma de México
y muy en especial a la Facultad de Química:*

*Por acogernos y compartir con
nosotras su inmensa sabiduría.*

A Jorge e Isela:

*Por el entusiasmo, dedicación y
paciencia que nos brindaron durante la
realización de este trabajo.*

Al Ing. Rodolfo Torres Barrera:

*Por el apoyo e interés demostrado
para la culminación de esta tesis.*

A nuestros maestros:

*Por su valiosa contribución en
nuestro desarrollo profesional.*

A los Huesca, Nava y Villalobos:

*Por cuidarnos y apoyarnos
incondicionalmente.*

A la generación de IQ-90:

*Por todos los gratos momentos
compartidos con ustedes.*

*CRIS y VERO**

Dedicado

A:

*Antonio e Hilda
Hilda y Raquel*

*Tali, los Navarro
y los Huesca*

(Mi querida familia)

A:

Vero

Ghenny

Karla

Veroka

Julieta

Areli

Pipo

Fishi

Fer

Jaime

Andrés

(Mis mejores amigos.....y algo más)

A:

*La Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la
Facultad de Química.*

(Mi segundo Hogar)

*"Por brindarme incondicionalmente
su amor, compañía, confianza,
apoyo, paciencia, ayuda y amistad
que me han permitido ser
quien soy y ser feliz."*

GRACIAS

CRISTINA

A Dios:

*Por el amor, la fe
y esperanza de cada día.*

A Carmen:

*Porque tu recuerdo y tu esencia
siempre vivirán en mi,
prolongados en mil ecos.
Te quiero y te extraño.*

A mis Padres:

*Con inmenso cariño y agradecimiento.
Por ser fuente inagotable de amor,
ejemplo de fortaleza y entrega.
Porque son lo más valioso que tengo.
Los adoro*

A Lety y Yola:

*Por ser amigas y maestras,
por el apoyo incondicional.
Por la nobleza de la hermandad
Las quiero tanto...*

GRACIAS

A mis siempre amigas:

*Cris, Ghenny, Claudia y Roberta
Por el sublime sentimiento de la amistad.*

A los buenos amigos:

Fer: por los grandes lazos

*Pipo: por la lealtad de tu
amistad*

*Eric: por tu comprensión y
apoyo*

*Ya todas aquellas personas que me
brindaron su amistad y que compartimos
momentos inolvidables:*

*Carla M. Federico, Julieta, Arturo,
Fish, Areli, Alberto, Memo y... Marcos*

*Hoy y siempre URAF**

VERÓNICA

EL REUSO DE RESIDUOS PELIGROSOS LÍQUIDOS COMO
COMBUSTIBLE ALTERNO EN HORNOS PARA LA FABRICACIÓN
DEL CEMENTO

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

I.- ASPECTOS GENERALES	1
1.1 Situación actual en el mundo	1
1.2 Situación actual en México	3
1.2.1 Fuentes generadoras de residuos peligrosos	4
1.3 Sistema Jurídico Mexicano	9
1.3.1 Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.....	10
1.3.2 Reglamento de residuos peligrosos.....	11
1.3.3 Normas Oficiales Mexicanas sobre residuos peligroso	12
II.- ALTERNATIVAS EN EL MANEJO Y LA DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS PELIGROSOS LÍQUIDO.....	14
2.1 Reducción de la generación de residuos peligrosos	14
2.2 Recuperación y reciclaje.....	16
2.3 Tratamientos.....	18
2.3.1 Tratamientos físicos	19
2.3.2 Tratamientos químicos.....	21
2.3.3 Tratamientos biológicos.....	25
2.3.4 Tratamientos térmicos	30
2.4 Disposición final.....	35

III.- EL REUSO DE RESIDUOS PELIGROSOS COMO FUENTE DE ENERGÍA	38
3.1 Hornos de fabricación de cal	39
3.1.1 Caso práctico tecnológicamente aplicado.....	43
3.2 Calderas Industriales	47
3.3 Hornos de fabricación de cemento.....	53
3.3.1 Caso práctico tecnológicamente aplicado	58
IV.- HORNOS DE CEMENTO: EL PROCESO ÓPTIMO	60
4.1 Química del cemento.....	60
4.2 Etapas del proceso de fabricación	62
4.3 Características que hacen del proceso del cemento el proceso óptimo.....	65
4.4 Incineradores	75
4.4.1 Descripción de los principales tipos de incineradores	80
4.4.2 Residuos incinerables	81
4.4.3 Caracterización de los residuos incinerables	82
4.4.4 Problemática de la incineración.....	85
V.- IMPORTANCIA DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS	87
5.1 Características y especificaciones de un combustible alternativo líquido	89
5.2 Especificaciones a evaluar en un residuo peligroso para la elaboración de un combustible alternativo líquido	93
5.3 Medición de emisiones a la atmósfera.....	98
5.3.1 Control de emisiones de compuestos orgánicos	99
5.3.2 Control de emisiones de metales tóxicos	100
5.3.3 Estándares de emisión para partículas.....	101
5.3.4 Control de emisiones para ácido clorhídrico y cloro gaseoso.....	102
5.3.5 Control de emisiones a la atmósfera en México.....	102

VI.- ESQUEMA DE UN PROGRAMA DE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS COMO COMBUSTIBLE ALTERNO EN MÉXICO.....	105
6.1 Descripción del esquema del programa de manejo de residuos peligrosos.....	108
6.1.1 Empresa generadora del residuo.....	108
6.1.2 Empresa de manejo y elaboración de combustible alternativo.....	108
6.1.3 Empresas de consumo de combustible alternativo (cementera).....	110
6.2 Diagrama de flujo típico para el manejo de combustible alternativo.....	112
6.3 Sistema de notificación y autorización	115
VII.- SITUACIÓN REAL DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS EN LA INDUSTRIA MEXICANA DEL CEMENTO.....	119
7.1 Producción y capacidad instalada del cemento.....	119
7.2 Consumo energético	126
7.3 Situación de los residuos peligrosos	127
7.4 Sustitución actual de combustóleo por combustible alternativo..	132
VIII.- JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.....	137
8.1 Ahorro económico obtenido de la implementación de la sustitución parcial de combustible alternativo en un horno de cemento.....	138
8.2 Ahorro económico proyectado en la implementación de la sustitución parcial de combustible alternativo en los noventa hornos existentes en México	145
8.2.1 Proyección de la tendencia del uso de combustibles alternos en E.E.U.U en los noventa hornos existentes en México..	152
8.3 Valor agregado en el uso de combustible alternativo.....	155
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	159
BIBLIOGRAFÍA.....	165

INTRODUCCIÓN

A través de los años, el hombre ha tenido la necesidad de crear procesos para la satisfacción de sus necesidades. Hasta hace poco, sólo se contemplaban los beneficios obtenidos del desarrollo tecnológico sin dar la debida importancia al impacto que pudiera causar al ser humano y al ambiente la generación de subproductos o residuos. Estos residuos se pueden clasificar para su estudio en emisiones hacia la atmósfera, aguas contaminadas y residuos industriales, éstos últimos se clasifican en residuos no peligrosos y residuos peligrosos. La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente define a un residuo peligrosos como cualquier material generado en los procesos de extracción, transformación, producción, consumo utilización, control o tratamiento en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas infecciosas o irritantes cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó y que representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.

La problemática causada por la generación de residuos peligrosos no solo ha obligado a tomar medidas a nivel nacional, sino que ésta se ha extendido a todo el mundo constituyendo hoy en día un problema multinacional. Debido al gran desarrollo tecnológico e industrial observado en México, como en el resto del mundo, la generación de residuos peligrosos se incrementa día con día y su manejo inadecuado ha causado severas consecuencias tanto en la salud humana como en el ambiente. Los principales generadores de residuos peligrosos son compañías que contribuyen, de una manera importante con la economía de sociedades industrializadas entre las que podemos mencionar las industrias metalúrgicas de hierro y del acero, la industria química, las actividades agrícolas, las industrias extractivas y las de servicios. Con frecuencias se observa una disposición clandestina de residuos peligrosos en tiraderos municipales, barrancas, drenajes municipales, etcétera, debido a que cerca del 90% de los residuos peligrosos adoptan estados líquidos, acuosos o semilíquidos.

Aun cuando en la actualidad esta problemática ha tomado gran importancia y se han implementado medidas de control, de reciclaje y reuso, tratamientos y reducción en la generación de residuos industriales peligrosos, éstos continúan incrementándose, lo que hace necesaria la búsqueda de nuevas opciones para su disposición y manejo.

La reducción de la generación así como el reciclaje y reuso de los residuos peligrosos son tendencias que cada día cobran mayor importancia por ser alternativas que en general no requieren de grandes inversiones y por el contrario, se puede obtener un ingreso económico del uso de los mismos. La implementación del reuso como una alternativa de manejo y disposición segura de los residuos peligrosos deberá apegarse a la legislación vigente (Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente y sus reglamentos correspondientes), así como crearse con la intención de disminuir emisiones, incluyendo las no consideradas por la legislación actual.

Una alternativa viable para los residuos peligrosos la constituyen los procesos industriales con altas temperaturas, los cuales hacen uso del poder calorífico de los residuos dando temperaturas y tiempos de residencia similares a los que requerirían los incineradores usados específicamente para la destrucción de residuos peligrosos. Debido a las condiciones de operación y al proceso en sí, los hornos utilizados en la fabricación de cemento pueden emplearse para el tratamiento de una amplia variedad de residuos peligrosos, lo cual, debidamente manejado, no causa un incremento en emisiones o un impacto ambiental contrario a lo que podría esperarse en la construcción de un incinerador de residuos peligrosos que utilizara combustóleo como combustible (altamente contaminante) o gas natural (combustible fósil), lo cual generaría una nueva fuente de emisiones. El uso de residuos peligrosos como combustible alterno en hornos de cemento no significa solamente la destrucción o estabilización de dichos residuos, sino una fuente alterna de combustible e incluso de materia prima.

Existe una fuerte sinergia entre las necesidades de la sociedad, la industria del manejo de residuos peligrosos y la industria del cemento. Esta sinergia es evidente: la sociedad necesita métodos eficientes y seguros de manejo de residuos peligrosos. La industria responsable de los residuos peligrosos necesita opciones de tratamiento térmico económico y la industria del cemento requiere nuevas fuentes de energía que disminuyan sus costos de operación.

Considerando que las tendencias a nivel mundial del reuso y reciclaje de residuos peligrosos se hacen cada vez más evidentes, este trabajo tiene la finalidad de proponer, como una opción más, el reuso de algunos residuos peligrosos que por si mismos cumplan con especificaciones técnicas tales como poder calorífico adecuado para su destrucción, contenido de metales, de agua, de azufre, de bifenilos policlorados, de sólidos totales, de compuestos clorados, densidad, viscosidad etcétera, o que mezclados, obtengan las características antes mencionadas para así poder emplearlos como una fuente de energía o un combustible alternativo en hornos de cemento.

Debido al enfoque que se le dará a este trabajo y a la amplitud que implicaría considerar todos los tipos de residuos, este estudio se limitará a analizar los residuos peligrosos líquidos con un poder calorífico adecuado para su destrucción térmica.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Situación actual en el mundo

Por la dificultad implícita en disponer de un inventario mundial de la generación de residuos peligrosos no se tiene un dato preciso, sin embargo, se estima que se generan anualmente alrededor de 350 a 400 millones de toneladas de estos residuos¹. Los principales generadores de residuos peligrosos son compañías que contribuyen, de una manera importante, con la economía de sociedades industrializadas entre las que podemos mencionar las industrias metalúrgicas del hierro y del acero o de metales no ferrosos, la industria química, las actividades agrícolas, las industrias extractivas y las de servicios (talleres automotrices, etc.).

Un factor importante que debe considerarse en los residuos peligrosos es que generalmente se presentan en forma de mezclas complejas que de acuerdo con su composición son más o menos peligrosas. Por tales motivos es de suma importancia contar con métodos analíticos que permitan realizar su caracterización.

Para poder determinar la peligrosidad de una sustancia en relación con la salud humana y el ambiente es necesario disponer de la información sobre sus propiedades físico-químicas, su toxicidad y biodegradabilidad así como de la forma en que se presenta.

Por desgracia, la sociedad no se percata de que ciertas actividades la dañan hasta el momento en que suceden accidentes que

¹ Cristina Cortinas de Nava y Silvia Vega, Residuos peligrosos en el mundo y en México. Serie monografías No.3, Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), Instituto Nacional de Ecología (INE), 1993, p.3 Evolución de la situación en el mundo.

causan generalmente lesiones irreparables; tal es el caso de la disposición inadecuada de residuos peligrosos las cuales han tenido consecuencias en la salud y el bienestar público, así como en el ambiente, y han hecho reflexionar al hombre que es más costoso remediar que prevenir.

Con la finalidad de difundir entre las comunidades la información generada sobre residuos peligrosos en forma tal que éstas puedan establecer juicios fundamentados y tomar parte en la planeación sobre los lugares de establecimiento de instalaciones de residuos peligrosos, así como estar al tanto de las medidas de seguridad y emergencia en dichas instalaciones, se han desarrollado legislaciones y estrategias para su puesta en práctica.

La problemática causada por la generación de residuos peligrosos no sólo ha obligado a tomar medidas a nivel nacional, sino que ésta se ha extendido a todo el mundo constituyendo hoy en día un problema multinacional. La movilización de una gran cantidad de países para plantear la problemática existente y formular planes de solución ha inducido el surgimiento de convenios binacionales así como multinacionales, entre los que destaca el Convenio de Basilea (Uruguay 1992), en el cual, alrededor de 90 países han determinado prohibir la importación de residuos peligrosos. Algunos de los puntos de este convenio en relación con los residuos peligrosos son:

1. Promover la prevención y reducción al mínimo de la generación de residuos peligrosos por medio de métodos limpios de producción; evitar el uso de sustancias peligrosas cuando existan sustitutos; recuperar, reciclar y usar materiales de modo directo o mediante usos alternativos.
2. Mejorar el conocimiento y la información sobre los aspectos económicos de la prevención y administración de los residuos peligrosos.

3. Aumentar el conocimiento acerca de los impactos de los residuos peligrosos en la salud y el ambiente.
4. Promover y fortalecer las capacidades institucionales para prevenir, minimizar y administrar los riesgos asociados con los residuos peligrosos.
5. Promover y fortalecer la cooperación internacional en el manejo de los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos, incluyendo el control y monitoreo, consistente con los instrumentos legales regionales e internacionales.

Así como se han planteado convenios internacionales, cada país, basado en el análisis de su situación, plantea medidas de solución y actúa conforme su desarrollo económico y tecnológico se lo permita.

1.2 Situación actual en México

Como resultado del desarrollo tecnológico e industrial en México, han surgido nuevas industrias para satisfacer las necesidades y comodidades del hombre. Este crecimiento industrial es símbolo de desarrollo, pero también de desequilibrio ambiental si todos los sectores que conforman a la sociedad no actúan adecuadamente. Por todo esto, la opinión pública se ha preocupado cada vez más por las cuestiones ambientales. Originalmente, la industria, interesada en la productividad, olvidó o dio poca importancia a los posibles residuos generados durante su proceso, ocasionando serias consecuencias ambientales como resultado de la falta de control a que debe estar sujeto todo tipo de residuo. Si bien es cierto que en México la generación de residuos se concentra en las ciudades de mayor crecimiento industrial, no debemos olvidar que existen en diversas partes del país gran cantidad de micro industrias que no cuentan con la estructura y la tecnología necesarias para dar un manejo y disposición adecuado a los residuos generados por

lo que, en conjunto, constituye una fuente generadora de residuos peligrosos muy importante.

Actualmente, la industria debe considerar de manera progresiva cada fase de sus actividades respecto a su impacto sobre el medio ambiente, y modificar tanto sus procedimientos como sus productos para adaptarse a esta "nueva sensibilidad ambiental".

1.2.1 Fuentes generadoras de residuos

A diferencia de los residuos sólidos municipales, el conocimiento que se tiene con relación a la generación y composición de los residuos industriales peligrosos en México es muy vago e impreciso, de manera que no existe un diagnóstico confiable de la situación actual (al menos a disposición del público). Sin embargo, para situar la problemática actual de residuos peligrosos en México, es necesario citar algunos datos estadísticos de la industria nacional.

La industria nacional está constituida básicamente por 4 sectores:

- 1) Industria manufacturera
- 2) Industria minera y de extracción de petróleo
- 3) Industria eléctrica
- 4) Industria de la construcción

La suma de unidades industriales de estos sectores es de 149,192² unidades, las cuales generan tanto productos terminados

Cortinas de Nava, *ibid*, p.117, Situación de los residuos peligrosos en México.

como productos secundarios y residuos. De estos últimos, gran cantidad son considerados peligrosos.

Todas estas industrias generan una gran cantidad de residuos peligrosos que difícilmente podemos cuantificar y caracterizar con exactitud.

Según datos de la extinta Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE)³ en 1986 se generaban en el país alrededor de 200,000 ton/día de residuos industriales, de los cuales un 75% (150,000 ton) provenía de la industria minera, y el resto de los procesos de transformación (50,000 ton). De éstos últimos, se estimaba que del 10 al 15% tendría carácter de "peligroso" de acuerdo con indicadores internacionales; es decir, se generaban en México de 5,000 a 7,500 ton/día de residuos peligrosos.

En 1987 se estimaba una cifra conservadora de generación de residuos peligrosos en México de 3,000,000 ton/año⁴.

La tabla 1.1 presenta un volumen estimado de generación de residuos sólidos industriales, incluyendo los peligrosos a nivel nacional de acuerdo con la cifra oficial reportada por la SEDESOL:

³ Gustavo Solórsano Ochoa, "La problemática de los residuos industriales en México", en Revista Mexicana del Petróleo, Jul-Ago 1993, p.18.

⁴ Gustavo Solórsano Ochoa, idem.

TABLA 1.1

VOLUMEN ESTIMADO DE GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES,
INCLUYENDO LOS PELIGROSOS A NIVEL NACIONAL.

	1990		1991	
	Ton / día	Miles Ton/año	Ton / día	Miles Ton/año
Minería extrac. y fundición	300,000	109,500	337,500	123,187
Química básica orgánica e inorg.	70,500	25,732	81,000	29,565
Agro- industria	29,500	10,767	31,500	11,498
Peligro- sos	15,000	5,657	14,500	5,292
Gener. Total	415,500	151,656	450,000	169,542

Fuente: Dirección General de Normatividad Ambiental. Instituto Nacional de Ecología, SEDESOL, 1992.

Para estimar la generación actual podría partirse de estos datos y aplicar cifras relativas al crecimiento industrial hasta 1995. Sin embargo, no es aconsejable, ya que si bien ha existido un crecimiento, éste no ha sido uniforme en toda la planta industrial del país habiendo sufrido algunas ramas industriales una severa crisis.

En el cuadro anterior se observa que las 450,000 ton/día de residuos generados, 14,500 ton/día corresponden a residuos peligrosos, lo que equivale a 5,000,000 ton/año.

Con respecto a la localización del problema derivado de los residuos industriales peligrosos se puede contar con una zonificación generada por la ubicación de las principales concentraciones industriales en México.

Las principales zonas generadoras de residuos industriales peligrosos son:

- 1) Zona metropolitana de la Cd. México (ZMCM)
- 2) Zona metropolitana de Guadalajara
- 3) Zona metropolitana de Monterrey
- 4) Zona Metropolitana de Toluca
- 5) Corredor industrial Minatitlán-Coatzacoalcos, Ver.
- 6) Corredor industrial Querétaro-Celaya-Salamanca-León.
- 7) Franja fronteriza del norte del país
- 8) Otras zonas industriales del país

Y en menor grado algunas de las principales refinerías del país.

De estas zonas la más importante en volumen de generación de residuos industriales peligrosos es la ZMCM ya que concentra una gran parte del valor de la producción industrial del país. En mayo de 1993 la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental consideraba un promedio de 1,370 ton/día de

residuos industriales peligrosos para la ZMCM⁵, estableciendo al sector químico como el generador del 75% del total mencionado.

En la actualidad existen 2,147 empresas en el norte de México, de las cuales, alrededor de 1,673, son generadoras de residuos peligrosos, es decir, un 78% del total. De estas industrias, casi el 30% envía sus residuos peligrosos a E.U.A, lo que equivale a 32,707 ton/año. Cerca de 5.4% de las empresas dispone sus residuos en México, lo que corresponde a 10,932 ton/año, y 65.6% de las industrias no dan a conocer el lugar de disposición de 16,050 ton/año de residuos peligrosos. Así pues, a nivel fronterizo se estima una generación aproximada de 60,000 ton/año de residuos peligrosos de los cuales solo 4% del total son reciclados y confinados en la parte norte del país⁶.

En años recientes, se han realizado esfuerzos en México para crear la infraestructura requerida para el tratamiento y disposición final de residuos industriales peligrosos; sin embargo, por diversas razones no ha sido posible consolidar en México la suficiente infraestructura que demanda la industria generadora de residuos industriales peligrosos para el adecuado tratamiento y/o disposición final de los mismos.

En México, actualmente existen sólo dos confinamientos controlados para residuos industriales peligrosos autorizados por la SEDESOL, uno de los cuales se ubica en el municipio de Mina, N.L., y el otro en la Cd. de Hermosillo, Son. Existe un tercero que posiblemente entre en operación en los próximos meses en el municipio de Guadalcázar, S.L.P.

⁵ Gustavo Solórzano Ochoa, *idem*.

⁶ Cortinas de Nava, *op. cit.*, p.119, Situación de los residuos peligrosos en México.

Respecto al tratamiento, existen en el país diversas empresas que prestan servicios en el campo del tratamiento de solventes y aceites gastados, principalmente. Por otra parte, sólo algunas industrias cuentan con incineradores privados, de modo que no existe en el país ningún incinerador a escala comercial para tratar aquellos residuos industriales peligrosos cuya alternativa de tratamiento es la combustión a altas temperaturas. Consecuencia de lo anterior es que debido a la carencia de una oferta atractiva de este tipo de servicios, cierta cantidad de residuos industriales peligrosos se vierten a drenajes y cuerpos receptores de manera clandestina en terrenos baldíos y cañadas.

Por todo lo anterior es urgente la ampliación de la infraestructura necesaria, de manera que se cuente con el apoyo de autoridades para que los proyectos viables puedan ser concretados en un tiempo razonable.

1.3 Sistema Jurídico Mexicano

La base del sistema jurídico mexicano se encuentra en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. De esta ley fundamental derivan las normas jurídicas específicas, siguiendo una jerarquización tal, que cada una valida y fundamenta a otra inferior.

Colocada en el primer lugar jerárquico, las leyes especiales son normas generales y permanentes, derivadas de la Constitución, respecto a la cual deben guardar congruencia y no contradecirla, contrariarla, rebasarla o modificarla.

En segundo nivel dentro de la escala jerárquica del Sistema Jurídico Mexicano están los reglamentos. Estos comprenden las disposiciones legislativas expedidas por el Poder Ejecutivo para el desarrollo o

instrumentación de las disposiciones legales. El reglamento deriva de una ley a la cual complementa y amplía en sus principios.

El tercer nivel de esta jerarquización está ocupado por las normas. Éstas son resoluciones de control ejercidas específicamente en el ámbito administrativo al provenir de decisiones emitidas por una o varias autoridades de la Administración Pública; en algunos casos son producto de un estudio particular de normalización, aprobado por una autoridad reconocida.

1.3.1 Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988, con base en los artículos 4, 25, 27 y 73 de la Constitución Política Mexicana. Esta ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución referida a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente en el territorio nacional y a las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, y su objeto es el de establecer las bases para:

- * Definir los principios de la política ecológica general y regular los instrumentos para su aplicación.
- * Propiciar el ordenamiento ecológico y la preservación, restauración y mejoramiento del ambiente.
- * Proteger las áreas naturales así como la flora y fauna.
- * Aprovechar racionalmente los elementos naturales.
- * Prevenir y controlar la contaminación del agua aire y suelo.
- * Promover la concurrencia del gobierno federal con las entidades federativas, municipios así como entre las diversas dependencias y la participación de la sociedad.

La LGEEPA está compuesta por 194 artículos, divididos en seis títulos:

- I. Disposiciones generales
- II. Áreas naturales protegidas
- III. Aprovechamiento racional de los elementos naturales
- IV. Protección al ambiente
- V. Participación social
- VI. Medidas de control y seguridad; y sanciones

Esta Ley define en su título I, artículo 3, fracción XXVII a los Residuos Peligrosos (RP) como "todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, infecciosas, biológicas o irritantes representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente."

La LGEEPA establece que la regulación de las actividades relacionadas con materiales o RP es un asunto de alcance general en la nación o de interés de la Federación y faculta a la SEMARNIP (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca) para que, previa opinión de otras dependencias del Ejecutivo Federal, publique los listados correspondientes. De manera particular y definitiva, la gestión de los RP está contenida en los artículos del capítulo V, título IV, denominado Protección al ambiente

1.3.2 Reglamento de residuos peligrosos

El 25 de noviembre de 1988 fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el Reglamento de la LGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos. Este reglamento tiene por objeto regular las actividades de

generación, almacenamiento, manejo, transportación, tratamiento, incineración, reuso y/o disposición final de residuos peligrosos. Para tal efecto, el Ejecutivo Federal, a través de la SEMARNYP (Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca), debe emitir los listados de residuos peligrosos y las Normas Oficiales Mexicanas que regulen el manejo de éstos así como autorizar y supervisar la instalación, construcción y operación de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final, etc.

Asimismo, obliga a las empresas generadoras, transportistas etc., a presentar periódicamente la información que sobre estas actividades se genere, mediante la presentación de diversos formatos. Crea igualmente, la metodología sobre las características de ciertas actividades. Por ejemplo: la implementación de bitácoras para el manejo de los residuos, las condiciones que deben reunir las áreas de almacenamiento, las de transporte y las de disposición final.

1.3.3 Normas oficiales mexicanas sobre residuos peligrosos

La LGEEPA previó la expedición de Normas Técnicas Ecológicas (NTE's) en las que se establecen requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deben de observarse en el desarrollo de actividades o uso de destino de bienes que causen o puedan causar desequilibrios a los ecosistemas o al medio en general; y que además permitan uniformar principios, preceptos, políticas y estrategias de conservación y restauración de los recursos naturales. Por tal razón, para regular la gestión de los residuos peligrosos se publicaron siete NTE's entre 1988 y 1989, las cuales fueron derogadas y transformadas en Normas Oficiales Mexicanas (NOM) con la expedición de la Ley de Metrología y Normalización el 22 de octubre de 1993 y son las siguientes:

- * NOM-CRP-001/93. (Actualmente: NOM-052-ECOL-93) Establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- * NOM-CRP-002/93. (Actualmente: NOM-053-ECOL-93) Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- * NOM-CRP-003/93. (Actualmente: NOM-054-ECOL-93) Establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la NOM-CRP-001/93 (Actualmente: NOM-052-ECOL-93).
- * NOM-CRP-004/93. (Actualmente: NOM-055-ECOL-93) Establece los requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto los radioactivos.
- * NOM-CRP-005/93. (Actualmente: NOM-056-ECOL-93) Establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
- * NOM-CRP-006/93. (Actualmente: NOM-057-ECOL-93) Establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.
- * NOM-CRP-007/93. (Actualmente: NOM-058-ECOL-93) Establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos

CAPITULO II

ALTERNATIVAS EN EL MANEJO Y LA DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS PELIGROSOS LÍQUIDOS .

La creciente industria y el consecuente incremento en la producción de residuos peligrosos ha creado un problema en cuanto al destino que se les debe dar a éstos; por ello es necesario tener buen control y manejo de estos materiales considerando las graves implicaciones resultantes de una disposición inadecuada.

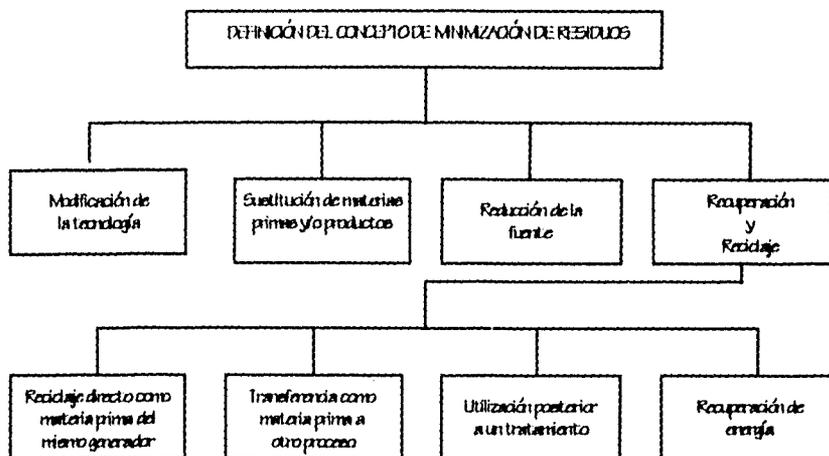
Las alternativas tecnológicas actuales para un manejo adecuado pueden concentrarse en cuatro grupos:

- 1) Reducción de la generación
- 2) Recuperación y reciclaje
- 3) Tratamiento
- 4) Disposición final

2.1 Reducción de la generación de residuos peligrosos

Las medidas adoptadas para reducir los residuos peligrosos incluyen las tecnologías destinadas a las modificaciones del proceso, a la sustitución de materias primas y/o productos, y a la reducción de la fuente, como se muestra en la figura 2.1.

FIGURA 2.1 ESQUEMA DE MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS

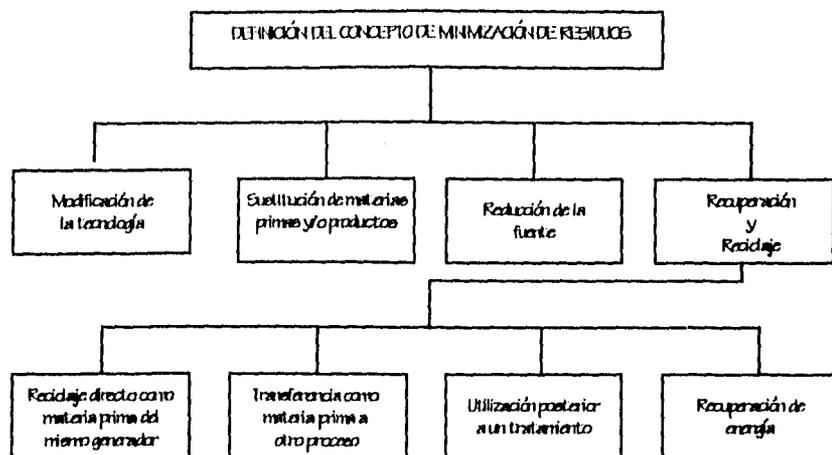


Todas estas modificaciones se traducen en procesos productivos más eficientes, capaces de economizar energía y aprovechar mejor las materias primas, así como disminuir la generación de residuos peligrosos, reduciendo con ello los costos de manufactura. Esto se puede lograr por medio de la modificación de los catalizadores empleados así como del diseño de reactores y modificación de parámetros de operación que demuestren un decremento significativo en la generación de residuos.

Sustitución de materias primas y/o productos

Mediante esta opción se busca reemplazar productos altamente tóxicos o peligrosos por otros que aporten los mismos beneficios y cuyo manejo a través de su ciclo de vida sea más seguro y respetuoso del ambiente. Tal es el caso de la sustitución de los bifenilos policlorados en los transformadores eléctricos por otro tipo de dieléctricos --como ciertos aceites-- o por aire. Algunas materias primas que son directamente sintetizadas en un producto, se pueden purificar anteriormente a su introducción al proceso con la finalidad

FIGURA 2.1 ESQUEMA DE MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS



Todas estas modificaciones se traducen en procesos productivos más eficientes, capaces de economizar energía y aprovechar mejor las materias primas, así como disminuir la generación de residuos peligrosos, reduciendo con ello los costos de manufactura. Esto se puede lograr por medio de la modificación de los catalizadores empleados así como del diseño de reactores y modificación de parámetros de operación que demuestren un decremento significativo en la generación de residuos.

Sustitución de materias primas y/o productos

Mediante esta opción se busca reemplazar productos altamente tóxicos o peligrosos por otros que aporten los mismos beneficios y cuyo manejo a través de su ciclo de vida sea más seguro y respetuoso del ambiente. Tal es el caso de la sustitución de los bifenilos policlorados en los transformadores eléctricos por otro tipo de dieléctricos --como ciertos aceites-- o por aire. Algunas materias primas que son directamente sintetizadas en un producto, se pueden purificar anteriormente a su introducción al proceso con la finalidad

de disminuir la generación de residuos. Materias primas auxiliares al proceso, pero que no forman parte del producto, se pueden sustituir por sustancias menos tóxicas o materiales más seguros para el ambiente. Un ejemplo de esto es la sustitución de solventes tóxicos clorados por detergentes biodegradables inocuos.

Reducción de la fuente

Este método es uno de los más importantes y económicos para disminuir la generación de residuos peligrosos, ya que puede ponerse en práctica en el mismo sitio en que éstos se generen. El principio en el que se basa es el de la prevención de la contaminación de grandes volúmenes de residuos industriales no tóxicos con residuos peligrosos y en el manejo y disposición final adecuada de estos últimos.

Estos métodos proporcionan beneficios importantes a las empresas al disminuir las cantidades de residuos peligrosos y reducir los costos de su manejo. Esto es lo que ocurre, por ejemplo, cuando las empresas que requieren grandes cantidades de agua separan las aguas empleadas para enfriar los procesos de las que contienen residuos químicos para recircularlas, en tanto que las segundas son sometidas a tratamiento antes de verterlas a descargas de aguas residuales.

2.2 Recuperación y reciclaje

Se trata de alternativas que, en general, no requieren de inversiones por parte de los generadores de residuos peligrosos; por el contrario, se puede obtener un ingreso económico de los residuos peligrosos mediante las siguientes opciones:

- a) Reciclaje directo como materia prima del mismo generador
- b) Transferencia como materia prima a otro proceso

- c) *Utilización posterior a un tratamiento*
- d) *Recuperación de energía*

El reciclaje directo se utiliza frecuentemente en la industria química cuando la materia prima no se consume completamente durante el proceso y el sobrante simplemente se regresa como alimentación.

En la actualidad, una sustancia que en un proceso es un subproducto o un residuo, en otro puede ser materia prima; incluso, algunos residuos se pueden utilizar en el control de la contaminación de otro proceso, por ejemplo, la cal residual colectada en el procesamiento de este material se puede emplear para neutralizar ácido residual o para precipitar metales en aguas contaminadas.

El reciclaje de sustancias peligrosas tiene una importancia mayor puesto que éste representa mayores ventajas que una simple disposición final, la cual implica grandes restricciones. Para determinar la factibilidad de reciclar o intercambiar materias primas intervienen numerosos factores, por ejemplo, que el material no contenga impurezas no deseables o incompatibles, o que la transportación sea factible. Por lo tanto se recomienda que las empresas generadoras de residuos peligrosos y las encargadas de su recuperación y/o reciclaje se instalen lo más cerca posible unas de las otras con el fin de facilitar las operaciones. Como ejemplo tenemos el reuso de solventes para equipo de limpieza, el reciclaje de los polvos colectados de pesticidas en la formulación de los mismos y el reuso de residuos de cloruro férrico de la manufactura del dióxido de titanio como un acondicionador de aguas residuales para su tratamiento.

La proporción de residuo a reciclar depende tanto del industrial como del proceso y de las especificaciones del residuo.

Los factores que influyen en la industria del reciclaje son:

- Tipo de proceso usado en la generación del residuo
- Volumen, composición y homogeneidad del residuo
- Usos y reusos que han sido identificados para el residuo
- Disponibilidad y precio de materiales puros relativos al costo de reciclaje y almacenamiento.

En la actualidad, México se encuentra ante una problemática tal, que es necesaria la modificación de las tendencias así como la apertura de nuevas alternativas sobre el manejo y la disposición de residuos; dichas alternativas deberán enfocarse a la reducción de éstos y al empleo de tecnologías limpias acopladas a procesos de reciclado y reuso de residuos. Todo esto con la finalidad de respetar la salud humana y el ambiente.

2.3 Tratamientos

A este grupo pertenece cualquier técnica, método o proceso que cambie las propiedades físicas, químicas o biológicas de los residuos peligrosos para reducir su peligrosidad, recuperar material, energía o incluso para reducir su volumen. El estudio de estos tratamientos se divide en:

- a) Tratamientos físicos
- b) Tratamientos químicos
- c) Tratamientos biológicos
- d) Tratamientos térmicos

2.3.1 Tecnologías de tratamientos físicos

Estos tratamientos se basan en la separación de fases y/o en la reducción de volumen para un tratamiento posterior o disposición final. Para destinar un residuo peligroso a un tratamiento físico no basta con conocer sus propiedades físicas; también es necesario considerar las químicas y las biológicas. Las tecnologías de tratamientos físicos más empleadas para residuos peligrosos son las siguientes:

Destilación

Consiste en la evaporación de uno o más componentes de una mezcla mediante una columna empacada o de platos para producir un destilado relativamente rico en componentes volátiles y un fondo de componentes menos volátiles o no volátiles. Puede realizarse en un solo paso (destilación "flash") o en multietapas, dependiendo de la separación requerida. La destilación en el tratamiento de residuos es ampliamente utilizada para la recuperación y/o purificación de solventes.

Evaporación

Este método es utilizado para recuperar algunos residuos que no son adaptables a la destilación. Generalmente se emplea para remover componentes orgánicos volátiles del agua, remover agua de componentes orgánicos con alto punto de ebullición o para separar los componentes orgánicos volátiles con un mayor grado de recuperación, reduciendo el volumen de los residuos generados por un proceso de destilación simple.

Extracción mediante solventes

Durante este proceso se transfiere una sustancia de una solución a un solvente (generalmente orgánico). Aun cuando la extracción mediante solventes tiene un excelente potencial para el tratamiento de residuos peligrosos, no ha sido ampliamente utilizada para estos propósitos. La mayor aplicación de la extracción mediante solventes ha consistido en remover fenol del agua resultante de la refinación del petróleo y de síntesis que involucren fenol.

Adsorción

En la adsorción, una superficie granular sólida retiene compuestos orgánicos o inorgánicos (metales pesados). Para ello, los materiales más empleados como adsorbentes son el carbón activado y la sílica gel o alúmina y se lleva a cabo en lechos o columnas empacadas con alguno de estos adsorbentes. El carbón activado es el más empleado y aun cuando puede regenerarse tiene algunas desventajas: no es apropiado para compuestos altamente solubles en agua y a menudo su uso requiere de tratamientos previos o posteriores además de ser un adsorbente caro.

Generalmente la capacidad de adsorción depende del peso molecular del compuesto adsorbido, de su grado de ciclización y de la presión y temperatura de operación.

Arrastre mediante vapor o aire

Es la separación de los componentes más volátiles de los menos volátiles de una mezcla mediante columnas de platos o empacadas a las que se les inyecta, como gas de arrastre, vapor o aire. Este método puede aplicarse para separar solventes orgánicos de mezclas que contengan compuestos no volátiles. El agua que ha sido

contaminada por compuestos orgánicos puede purificarse mediante arrastre con aire.

Ósmosis inversa

Es la técnica de membrana más utilizada para el tratamiento de residuos peligrosos especialmente en la industria de recubrimientos metálicos en la purificación de agua contaminada con iones sulfato, zinc, cobre y níquel.

Electrodiálisis y ultrafiltración

Ambas técnicas son de purificación mediante membrana; en la primera, la fuerza directriz es la electrólisis de una corriente directa entre dos electrodos y en la segunda, la membrana actúa como un filtro para sólidos. La electrodiálisis se utiliza frecuentemente en la purificación de agua y la ultrafiltración para separar soluciones orgánicas de cierta masa molecular, por ejemplo, aceites suspendidos, grasa y sólidos muy finos en agua.

Es necesario mencionar que los procesos basados en la separación por membranas tienen numerosas aplicaciones para el tratamiento de residuos peligrosos; sin embargo resultan muy costosos.

2.3.2 Tecnologías de tratamientos químicos

La aplicación de tratamientos químicos a los residuos peligrosos depende en gran medida de las propiedades de los constituyentes de los residuos. El comportamiento químico de éstos nos lleva al uso de diversas operaciones unitarias basadas en propiedades químicas y en reacciones dadas para su tratamiento, entre las cuales se encuentran:

- Neutralización ácido/base

- Precipitación
- Floculación
- Oxidación
- Reducción
- Extracción y lixiviación
- Intercambio iónico

Las reacciones químicas son el medio para destruir los residuos peligrosos y brindan además la oportunidad de tratar residuos con otros residuos.

Neutralización ácido/base.

Es muy común encontrar ácidos y bases en los residuos peligrosos. Su presencia en aguas residuales como en residuos lixiviados se manifiesta en lecturas de pH altas o bajas, pero en general, extremas.

El proceso usado para eliminar residuos ácidos o básicos se denomina neutralización. Si se presenta gran cantidad de base en el residuo, se adiciona ácido que reaccionará con los OH^- ; por lo contrario, si se presenta una gran cantidad de ácido se adicionará base para hacerla reaccionar con los H^+ .

El tipo de ácido o base que se deberá usar para el tratamiento de residuos peligrosos estará determinado por el costo y la seguridad que brinde la operación. La neutralización o ajuste de pH se requiere en muchas ocasiones como acondicionamiento previo para poder aplicar otros procesos en el tratamiento de residuos peligrosos.

Precipitación química.

La precipitación es el fenómeno en el cual aparece un sólido que se presenta cuando se le agrega un soluto a un solvente en el cual se encuentre un sólido disuelto. La precipitación se utiliza para tratamientos primarios de residuos peligrosos para remover del agua iones de metales pesados.

El método de la precipitación química se utiliza comúnmente en la precipitación de metales en forma de hidróxidos y de sales básicas con cal o con polielectrolitos. La solubilidad de algunos sulfatos de metales pesados es extremadamente lenta, por lo que la precipitación de sulfatos resulta un tratamiento muy efectivo. Algunos metales pueden precipitarse en la solución en la forma elemental del metal por medio de la acción de agentes reductores.

Floculación química.

Muchos sólidos formados por reacciones químicas no producen inmediatamente precipitados ordenados como tales. Así, una gran cantidad de precipitados son suspensiones coloidales que no tienen orden o que forman un volumen importante de precipitado con un contenido muy alto de agua. Es recomendable adicionar agentes químicos floculantes a este tipo de suspensiones para aglomerar las partículas coloidales formando grupos en los cuales se unen las partículas en forma ordenada, logrando tener una densidad relativa que finalmente les permita precipitar. Los floculantes son especies poliméricas, frecuentemente polielectrolitos, que están formados de moléculas largas con grupos funcionales adheridos como el SO_3^- o NH^+ .

Óxido / reducción.

La oxidación y la reducción pueden emplearse en el tratamiento y remoción de una gran variedad de residuos inorgánicos y orgánicos. Algunos residuos oxidantes pueden utilizarse para tratar residuos oxidables en agua y cianuros. El resultado neto de una reacción de oxidación o reducción usada para tratar los componentes de un residuo en solución acuosa es la conversión del residuo a una forma no peligrosa o a alguna forma en que pueda ser tratado físicamente.

Electrólisis.

La electrólisis consiste en una óxido/reducción electroquímica de especies químicas en solución aplicando corriente a los electrodos por medio de una fuente externa. Una especie en solución (normalmente un ión metálico) es reducida por los electrones del cátodo mientras otra especie brinda electrones al ánodo donde es oxidada. La aplicación de la electrólisis a los residuos peligrosos es comúnmente usada de la misma forma que en el recubrimiento de metales.

Extracción química y lixiviación.

La extracción química o lixiviación se utiliza en el tratamiento de residuos peligrosos para la remoción de constituyentes peligrosos por medio de reacciones con extracciones en la solución.

Las soluciones ácidas disuelven, en poca proporción, las sales de metales pesados solubles por medio de la reacción de los aniones de la sal con los H^+ .

Los ácidos también disuelven compuestos orgánicos básicos como las aminas y la anilina. Cuando estén presentes sulfatos o cianuros debe evitarse la extracción con ácido para prevenir la formación de cianuro de hidrógeno o sulfato de hidrógeno.

Intercambio iónico.

Intercambio iónico significa sacar cationes o aniones de una solución sobre resinas sólidas. Los iones que se encuentran en una resina usada para el intercambio iónico pueden removerse por medio de tratamientos con soluciones concentradas de ácidos, bases o sal (NaCl). El resultado neto es la concentración de los iones removidos originalmente de una solución diluida en agua a una solución mucho más concentrada.

El principal uso que se le da al intercambio iónico para el tratamiento de residuos peligrosos es remover de las aguas residuales los metales pesados que se encuentran en bajo nivel.

Para poder aplicar el intercambio iónico es necesario considerar previamente algunas características de los residuos; esto incluye sus características físicas, la presencia de oxidantes, el contenido de metales pesados, los constituyentes orgánicos y los sólidos suspendidos.

2.3.3 Tecnologías de tratamientos biológicos.

La biodegradación de residuos consiste en su conversión en moléculas inorgánicas simples por medio de procesos biológicos y, hasta cierto punto, en materiales biológicos. La bioconversión completa de sustancias a especies inorgánicas como CO_2 , NH_3 y fosfatos se llama mineralización. La destoxificación se refiere a la conversión biológica de sustancias tóxicas a especies de menor toxicidad.

Generalmente los productos de la biodegradación son moléculas que existen en la naturaleza y que se encuentran en equilibrio termodinámico con sus alrededores. La biodegradación se lleva a cabo por medio de la acción de microorganismos, bacterias particulares y hongos.

La biodegradación de aguas residuales municipales y residuos sólidos en los suelos se lleva a cabo bajo estudios previos. La biodegradación de algunos tipos de residuos que pueden ser metabolizados se realiza cuando el residuo está sujeto a condiciones que lo llevan hacia un proceso biológico. El tipo más común de biodegradación es el proceso aerobio en el cual se utilizan bacterias y hongos que requieren de oxígeno molecular, O_2 . Estos procesos son muy favorecidos por microorganismos, en parte por la alta producción de energéticos que se obtiene cuando el oxígeno molecular reacciona con la materia orgánica .

Asimismo, en ausencia de aire, tiene lugar la biodegradación anaerobia cuyos microorganismos degradan los residuos en ausencia de oxígeno. Este tipo de tratamiento puede utilizarse en una gran variedad de residuos peligrosos. Además, las especies inorgánicas están sujetas a los procesos aerobios y anaerobios.

Si bien los tratamientos biológicos de los residuos están normalmente encaminados a degradarlos en simples especies inorgánicas como dióxido de carbono, agua, sulfatos y fosfatos, no se puede ignorar la posible formación de grupos complejos o de especies químicamente más peligrosas.

Lodos activados.

Entre los tratamientos aeróbicos para residuos se encuentran los procesos de lodos activados. Éstos pueden aplicarse a residuos peligrosos, como procesos químicos. Algunos sistemas utilizan carbón activado como aditivo para adsorber residuos orgánicos no biodegradables.

El proceso de lodos activados es un tipo clásico de tratamiento basado en sistemas de cultivos biológicos suspendidos; probablemente, este tipo de proceso biológico es el más usado para el

tratamiento de aguas con residuos orgánicos e industriales. Sin embargo, este proceso sólo puede tratar corrientes de desechos orgánicos acuosos que tengan un porcentaje menor al 1% de contenido de sólidos suspendidos, y no acepta grandes concentraciones de orgánicos. Asimismo, la corriente de desechos ha sido sometida usualmente a un proceso de pretratamiento.

Generalmente, el proceso de lodos activados es capaz de descomponer alcoholes, aldehidos, ácidos grasos, alcanos, alquenos, cicloalcanos y aromáticos. Algunos otros compuestos como los isoalcanos y los hidrocarburos halogenados son más resistentes a la descomposición microbiana. Asimismo, el grado del tratamiento y de descomposición dependen del aclimatamiento de la biomasa en el sistema de lodos activados. Sin embargo, sólo residuos acuosos diluidos pueden tratarse normalmente, puesto que los residuos orgánicos más peligrosos son inhibidores tóxicos para el sistema, a menos que se encuentren en muy bajas concentraciones; por lo tanto, el tratamiento de residuos peligrosos bajo este proceso resulta mejor si el residuo acuoso está mezclado con corrientes con mayor capacidad de biodegradación.

Bioreactores.

Los bioreactores se utilizan para eliminar con agua los contaminantes biodegradables de mezclas de suelos contaminados. Esto es posible, en principio, si los contaminantes biológicos del suelo se tratan bombeando agua oxigenada enriquecida con nutrientes para formar un sistema con recirculación. Los tratamientos aeróbicos para suelos contaminados son relativamente caros, debido en parte a la gran cantidad de energía que se requiere.

Filtros de contacto

Este proceso de filtración pone en contacto a los residuos acuosos con microorganismos aeróbicos por medio del escurrimiento del residuo acuoso en camas fijas de piedra o de un medio sintético que soporta a los microorganismos. Los residuos acuosos se distribuyen como rocío sobre la cama. La aereación de la cama se lleva a cabo debido a una convección natural por medio de una diferencia de temperaturas entre el aire del medio empacado y el ambiente. En algunos casos se emplea la convección forzada cuando las condiciones no son óptimas para que se lleve a cabo una convección natural.

Los filtros de contacto se aplican generalmente para el tratamiento de residuos del mismo tipo que los tratados con lodos activados. Debido al corto tiempo de residencia del residuo acuoso en contacto con los microorganismos, el porcentaje de orgánicos removidos no es tan grande como en el tratamiento de lodos activados. El grado de remoción de orgánicos depende del medio usado. Los filtros de contacto son buenos para remover residuos constituidos por: acetaldehidos, ácido acético, acetona, acroleínas, alcoholes, benceno, butadienos, hidrocarburos clorados, cianuros, formaldehidos, ácido fórmico, cetonas, monoetanolaminas, dicloropropileno y resinas.

La ventaja de los procesos de filtro de contacto comparado con otros sistemas de tratamiento de residuos acuosos es el ahorro de energía necesaria para la agitación o para la formación de un área de contacto gas-líquido. La energía requerida es únicamente la necesaria para transferir el líquido y distribuirlo sobre las camas empacadas por lo que su costo de operación es bajo.

Contactor biológico rotatorio.

En el contactor biológico rotatorio, se crea una capa microbiana sobre un medio de soporte sumergible que gira lentamente en forma horizontal axial en un tanque con el fluido de los residuos acuosos. La capa microbiana está expuesta sucesivamente a los nutrientes en los residuos acuosos y al aire en el medio de rotación. Esta función mantiene a la biomasa en condiciones aerobias. El medio de soporte se puede encontrar en muchas formas, como discos, constricciones enrejadas o en contenedores de recipientes plásticos.

Procesos de contacto anaerobio.

Los digestores anaerobios son tradicionalmente usados como procesos de soporte en el campo de los tratamientos biológicos. Sólidos orgánicos y lodos microbianos de las clarificaciones primaria y secundaria son procesados anaeróbicamente para reducir su volumen y lograr su estabilización. Debido al bajo consumo de energía y a la poca producción de sólidos comparados con los procesos aerobios, los procesos anaerobios son de suma importancia para el tratamiento de residuos industriales.

El proceso de contacto anaerobio, similar al proceso de lodos activados, está conformado por un gran digestor seguido de un clarificador. El digestor anaerobio es un tanque cerrado con capacidad de mezclado. El mezclado debe estar acompañado de mecanismos de agitación, circulación de gas o bombeo. El tiempo de residencia de los residuos líquidos depende de la temperatura del digestor. El lodo se sedimenta en el clarificador y se recircula al digestor donde se manipulan una gran cantidad de microorganismos.

Comparado con los procesos de lodos activados aireados, los digestores anaerobios requieren de menor energía, producen menor cantidad de lodos, así como de sulfatos (H_2S), los cuales crean la

precipitación de iones tóxicos de metales pesados y producen gas metano, CH₄, el cual puede utilizarse como fuente de energía.

2.3.4 Tecnologías de tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos generalmente se usan para completar el proceso de tratamiento de residuos peligrosos. Por medio de este método pueden eliminarse materiales orgánicos volátiles, y pueden destruirse los compuestos tóxicos. Sin embargo, en algunos casos, los procesos térmicos generan subproductos peligrosos, por lo que deben tomarse medidas específicas de control.

La aplicación más común de los tratamientos térmicos para residuos peligrosos es la incineración. Ésta utiliza altas temperaturas, atmósferas oxidantes y, frecuentemente, condiciones turbulentas de combustión para destruir los residuos. Existen algunos otros métodos que utilizan altas temperaturas para destruir o neutralizar los residuos peligrosos. Entre ellos se incluye la pirólisis en la cual el material es calentado fuertemente en ausencia de oxígeno; la gasificación en la cual el residuo es tratado en una atmósfera reductora que da como productos gases combustibles; la oxidación húmeda que incluye reacciones con oxígeno de sustancias disueltas en agua sobre calentada, y algunas otras tecnologías convencionales.

Incineración.

La incineración de residuos peligrosos se define como el proceso mediante el cual se expone el material residual a condiciones de oxidación a temperaturas muy altas, usualmente mayores a los 900°C. Normalmente, el calor requerido para la oxidación proviene de la oxidación de enlaces orgánicos de carbono e hidrógeno contenidos en los materiales residuales o en combustibles alternos.

Adicionalmente, muchos residuos líquidos pueden quemarse como material reutilizable en hornos de cemento; clasificados como mezclas de combustibles suplementarios, estos materiales pueden quemarse en hornos de cemento aunque esto no representa un proceso de incineración en el sentido estricto. En la incineración de residuos peligrosos se utiliza una gran variedad de sistemas de combustión. Idealmente, los residuos incinerables son sobre todo orgánicos. Los materiales que tienen un poder calorífico superior a las 5500 cal/g se queman eficientemente.

Muchos residuos industriales que incluyen residuos peligrosos se queman como combustible para cubrir el requerimiento energético de hornos y calderas industriales así como en incineradores para residuos no peligrosos como incineradores de lodos de aguas residuales. Estos procesos se conocen como procesos de coincineración.

Los combustibles de residuos líquidos peligrosos deben cumplir con importantes requerimientos: contener no más del 1% de agua libre; tener un valor calorífico de al menos 666,000 cal/lit; poseer una viscosidad suficientemente baja para ser bombeada e inyectada dentro del quemador; no tener una cantidad de sólidos superior a 20% en volumen; y el contenido de metales no debe contribuir excesivamente al volumen de cenizas y por lo tanto a la toxicidad⁷.

La eficiencia de la incineración, la capacidad del incinerador, el control de emisiones, la protección del equipo para incinerar y el personal requerido para su operación son factores importantes que hacen necesaria una caracterización cuidadosa de los residuos antes

⁷ Stanley e. Manahan, Hazardous Waste Chemistry, Toxicology and Treatment, p319.

de su incineración. Asimismo, la preparación del residuo depende de la naturaleza del mismo y del proceso que se utilizará.

Los incineradores de residuos peligrosos están clasificados de acuerdo a la configuración de la cámara de combustión. Los incineradores más comunes de cámara de combustión son de inyección líquida, de lecho fijo, rotatorios y de lecho fluidizado.

- Incineradores de inyección líquida

Estos incineradores queman residuos líquidos. El área superficial máxima y la conversión a gas combustible se lleva a cabo mecánicamente por medio de la dispersión de los residuos líquidos a través de pequeños aspersores que los inyectan dentro del incinerador, los cuales se queman en su forma atomizada. El combustible y los residuos deben inyectarse separadamente. La eficiencia de combustión está limitada por las características de los atomizadores.

- Incineradores de lecho fijo.

Los incineradores de lecho fijo tienen una o varias cámaras donde se lleva a cabo la combustión. Estos incineradores pueden operar en dos etapas; la primera tiene una deficiencia estequiométrica de oxígeno y la segunda, opera con un exceso de aire a alta temperatura. Este tipo de incineradores puede utilizarse para residuos sólidos y líquidos.

- Incineradores rotatorios.

Los incineradores rotatorios son aquellos en los cuales la cámara de combustión primaria es un cilindro rotatorio forrado con materiales refractarios. Generalmente tienen un postquemador corriente abajo del incinerador para completar la destrucción de los residuos. Los incineradores rotatorios operan con una gran variedad de residuos



líquidos, semisólidos (lodos), y sólidos, que pueden quemarse simultáneamente.

Los incineradores rotatorios son muy usados en la destrucción de residuos peligrosos; de acuerdo con un estudio efectuado en Canadá, estos incineradores son considerados como los más versátiles para la destrucción de residuos peligrosos.

- Incineradores de lecho fluidizado.

Los incineradores de lecho fluidizado poseen una cama de un sólido granulado (parecido a la arena) la cual se mantiene suspendida por medio de la inyección de aire. Este dispositivo puede emplearse para residuos líquidos o sólidos con un tamaño de partícula relativamente uniforme. Las ventajas que tienen los incineradores de lecho fluidizado son: un excelente mezclado, requerimientos mínimos para obtener el exceso de aire y, capacidad para retener a los residuos gaseosos en el material del lecho. El precalentamiento y la inyección del aire dentro del lecho reducen los efectos de enfriamiento y habilitan al incinerador de residuos con valores bajos de calentamiento.

- Incineradores de sistema de plasma.

Estos incineradores usan plasma de aire ionizado inyectado a través de un arco eléctrico dentro del cual los residuos líquidos son inyectados. Las temperaturas son extremadamente altas, de entre 5000-15,000 °C. El plasma rompe las moléculas de los residuos en sus átomos constituyentes, los cuales adquieren su forma elemental o se recombinan en moléculas simples como CO y HCl. El gas combustible producido se quema posteriormente.

- Reactores eléctricos.

Los reactores eléctricos usan paredes incineradoras con resistencias que llegan a una temperatura de alrededor de 2,200 °C para calentar los residuos transfiriendo calor por medio de radiación. Este sistema piroliza los residuos hasta alcanzar su destrucción.

- Combustión de sales fundidas.

Este proceso usa una cama de carbonato de calcio fundido a una temperatura de alrededor de 900 °C para destruir los residuos. HCl gaseoso, residuos de NO_x y SO₂ quedan retenidos en la sal fundida regulando la contaminación del aire. El azufre de los compuestos sulfurados incinerados en el proceso de sales fundidas es retenido como Na₂SO₄ ó Na₂SO₃, el fósforo como Na₃PO₄ y el cloro como NaCl. El silicio es convertido a silicato de sodio (Na₂SiO₃).

- Proceso de vidrio fundido.

Este proceso usa una alberca de vidrio fundido para transferir calor a los residuos y para retener los productos. Este método es usado para la incineración de residuos que contienen metales pesados, los cuales pueden causar graves problemas al estar presentes en las cenizas.

Oxidación húmeda con aire.

Los compuestos orgánicos y las especies inorgánicas oxidables pueden oxidarse en solución acuosa. La fuente de oxígeno generalmente utilizada es el aire. Para usar este proceso se requieren condiciones extremas de presión y temperatura. La alta presión combinada con una concentración alta de oxígeno disuelta en agua y el aumento de temperatura permiten que la reacción se lleve a cabo.

En el primer paso del proceso, los residuos líquidos y el aire hacen subir la presión. Un calentamiento primario inicia la reacción, después de lo cual, las reacciones de oxidación exotérmicas en la mezcla de reacción ayudan a generar el calor para hacer que ésta continúe. El tiempo en el cual el residuo está expuesto a la oxidación está controlado por el tiempo de residencia en el reactor. Después de descargar el reactor, los residuos líquidos tratados son enfriados con una mezcla de aire húmedo. Los gases son separados en un tanque adicional. Los hidrocarburos contaminantes pueden presentarse en este gas. Los productos líquidos de la oxidación pueden requerir de un tratamiento adicional como la adición de azufre para la precipitación de metales. La oxidación húmeda puede aplicarse, por ejemplo, para la destrucción de cianuros.

Alrededor de los 390 °C de temperatura y 218 atm de presión el agua está en condiciones supercríticas y los enlaces de hidrógeno en la moléculas de agua en estado líquido no están presentes por mucho tiempo. Debajo de estas condiciones, el agua retoma su capacidad de solvente haciendo que compuestos orgánicos se disuelvan rápidamente y las sales precipiten. La adición de oxígeno al agua supercrítica que contiene compuestos orgánicos puede causar su destrucción o la conversión a moléculas menores.

2.4 Disposición final.

La creciente industria y el consecuente incremento en la producción de residuos peligrosos ha creado un problema en cuanto al destino que se les debe dar. La disposición final es una alternativa más para el manejo de los residuos industriales peligrosos y es la acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuadas para evitar daños al ambiente.

Este método incluye tecnologías empleadas en el depósito, inyección a pozos profundos, descarga al océano o confinamiento de

los materiales resultantes del tratamiento de los residuos industriales peligrosos o incluso residuos que puedan eliminarse sin previo tratamiento. Esta disposición deberá efectuarse bajo los lineamientos que marca el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) en materia de residuos peligrosos.

Inyección a pozos profundos

Es un proceso utilizado principalmente para disponer aguas residuales, soluciones de sustancias tóxicas o gases y sólidos disueltos. Para esto se utilizan pozos ya abandonados o se construyen ayudándose de la maquinaria de la industria petrolera. Estos pozos deben localizarse debajo de los mantos freáticos, tener una formación geológica apropiada y estar aislados por un impermeable.

Debe considerarse que la inyección se lleva a cabo a presión y temperatura elevadas y esto puede ocasionar reacciones químicas no deseadas, asimismo la presencia de aceites o sólidos pueden causar obstrucción en la inyección.

Si este método no se emplea con cuidado puede convertirse en un medio de contaminación de agua más que de disposición de residuos; cabe destacar que esta tecnología no se practica aún en nuestro país.

Tiraderos en el mar

Esta disposición está regulada mediante convenios internacionales donde se especifican, por medio de un listado, los tipos de residuos que pueden disponerse de esta manera. En esta lista están exentos los derivados organohalogenados y organosalicílicos, mercurio o sus

derivados, cadmio, carcinogénicos y aun plásticos que puedan interferir en actividades de pesca o navegación.

Confinamientos controlados

Son lugares donde se almacenan residuos peligrosos en celdas ubicadas debajo o encima de tierra, cubiertas o aisladas con materiales especiales para evitar lixiviados. En algunas ocasiones los materiales que se van a enterrar se tratan con técnicas tales como inmovilización la cual se basa en convertir los residuos a formas insolubles que no produzcan lixiviados que afecten al subsuelo y los mantos. En caso de tener dichos lixiviados deben removerse mediante tuberías y bombeo para evitar su acumulación; además, estos confinamientos deben tener tuberías de escape para los gases que se formen.

Ocasionalmente, suelen utilizarse para estos fines las minas abandonadas, preferentemente aquellas que por su naturaleza son impermeables a los líquidos y gases (minas de sal por ejemplo), con la finalidad de evitar la corrosión en los recipientes metálicos contenedores de los residuos peligrosos a enterrar.

CAPÍTULO III

EL REUSO DE RESIDUOS PELIGROSOS

COMO FUENTE DE ENERGÍA

Una alternativa viable de destrucción térmica para los residuos peligrosos la constituyen los procesos industriales con altas temperaturas, los cuales hacen uso del contenido de calor de los residuos dando temperaturas y tiempo de residencia similares a los que requerirían los incineradores usados específicamente para la destrucción de residuos peligrosos. Adicionalmente, el ahorro que brinda el poder calorífico del residuo, y el uso de equipo industrial ya existente comparado con el capital necesario para la instalación de un incinerador independiente al proceso hacen de ésta una alternativa ambientalmente aceptable en relación con la disposición convencional de los residuos peligrosos.

En la actualidad existe una gran variedad de procesos que emplean hornos industriales, los cuales al operar a temperaturas elevadas permiten a estos hornos emplear residuos peligrosos como un combustible alterno.

Tres de los procesos más importantes que pueden aplicarse en México son:

- 3.1. Hornos de fabricación de cal
- 3.2. Calderas industriales, y
- 3.3. Hornos de fabricación de cemento

3.1 Hornos de fabricación de cal

Un excelente ejemplo de este tipo de procesos alternativos por su gran consumo de energía lo constituyen los hornos de cal. Estos hornos operan generalmente a temperaturas de hasta 1200°C, tienen un tiempo de residencia aproximado de 1.5 segundos a esa temperatura y poseen una zona de combustión de alta turbulencia.

Descripción del proceso de fabricación de cal.

a) Hornos rotatorios (poco usados en México)

Este proceso industrial incluye el calentamiento de la piedra caliza a temperaturas aproximadas de hasta 1200°C en hornos rotatorios horizontales para la preparación de la cal como producto terminado. La calcinación se logra por medio del contacto entre los gases calientes con la piedra caliza (CaCO_3), la cual libera dióxido de carbono (CO_2) como producto de la descarbonatación, dando como producto terminado la cal (CaO), la cual posteriormente se hidrata para generar cal hidratada (CaOH). El horno, con un recubrimiento interno de ladrillos refractarios, tiene un diámetro aproximado de 2.4 m y una longitud promedio de 70 m. El horno gira lentamente (aproximadamente 1 revolución por minuto) y tiene una ligera pendiente (6 cm/m de longitud) para que el material se pueda mover por gravedad. Asimismo, los hornos tienen un patrón de flujo concurrente, es decir, los materiales sólidos viajan en un sentido y los gases calientes y emisiones de polvo en sentido opuesto.

Los combustibles tradicionalmente usados como combustóleo, carbón (en hornos antiguos) y gas natural proporcionan una fuente de calor de:

Combustóleo 10,100 kcal / kg

Carbón base seca 7,700 kcal/kg

Gas natural 12,430 kcal/kg

El carbón y el gas natural dan un calor de entrada de aproximadamente 14700 kw (50 millones BTU/hr o 6.5 millones BTU/ton de cal terminada). Debido a que la piedra caliza alimentada viaja hacia abajo dentro del horno rotatorio inclinado, pasa a través de diversas zonas de temperatura y los gases calientes calcinan a la piedra caliza hasta obtener la cal. La producción de cal en un horno de estas dimensiones es de aproximadamente 7.72 Ton/hr.

Después del calentamiento y la transformación dentro del horno, la cal se enfría por medio de aire y se almacena en silos.

El horno se alimenta, en primer lugar, de una mezcla de aire, gas y carbón y, en segundo lugar, con el aire resultante del enfriamiento de la cal, la cual puede proveer de oxígeno para la combustión del carbón y gas natural (o residuo combustible). Los gases de combustión del horno pasan a través de enfriadores para disminuir la temperatura de los gases antes de llegar al absorbedor, donde las partículas y SO₂ son removidas de la corriente gaseosa. Los gases restantes pasan a través de ventiladores y salen por la chimenea a aproximadamente 200°C y 5.5 m/s. El polvo colectado se almacena en un silo y se mezcla con agua para granularlo. Una parte del polvo se vende y el resto se regresa a la cantera. Ningún polvo se reinyecta en el horno.

b) Hornos verticales

Este tipo de hornos se encuentra muy generalizado en la industria calera en México. De modo general, adopta forma cilíndrica, encontrándose la alimentación en la parte superior del horno y la descarga en la parte inferior. La calcinación se realiza por medio de

quemadores instalados en la parte inferior, utilizando como combustible combustóleo o gas, a una distancia adecuada de la descarga del horno.

En los hornos verticales de fabricación de cal la piedra caliza se alimenta por la parte superior del horno, la cual es transportada por medio de canastillas montadas sobre rieles. La boca de la alimentación se encuentra cubierta por una campana de lámina de construcción rectangular con una puerta movable que permite la entrada de la piedra al horno.

La parte exterior del horno, de forma cilíndrica, está construida con piedra volcánica, tiene una altura promedio de 13.5 m y un diámetro exterior en general de 4.10 m. Se encuentra rodeado por cuatro cinturones de acero de 10 cm de ancho, colocados a distancias convenientes.

En la parte interior, en el piso del horno, se encuentra la boca de la descarga conectada directamente a una caja rectangular de lámina que tiene en el fondo cuatro compuertas por medio de las cuales se efectúan la descarga de la cal ya calcinada dejándola caer sobre las carretillas que la transportan a los molinos.

En la parte superior, sobre la cubierta de la alimentación, se encuentra una chimenea para la salida de los gases por tiro natural y a un lado se localiza otra salida de gases conectada a un ventilador que provoca el tiro inducido.

En la parte interior, el horno se divide en tres secciones: la primera comprende desde la zona de alimentación hasta una distancia de 4 m hacia abajo; a este espacio del horno se le denomina "zona de precalentamiento". Aquí el material recibe el calor proveniente de los gases de salida y tiene por objeto secar la caliza y calentarla lo más posible pero sin llegar a la temperatura de calcinación.

Los primeros 3.68 m no tienen materiales refractarios y este espacio del horno queda limitado por piedra volcánica únicamente. La segunda sección principal, que comienza al terminar la zona de precalentamiento y acaba más abajo de los quemadores, recibe el nombre de "zona de calcinación". En este espacio es donde la piedra caliza recibe la mayor cantidad de calor dando lugar a su descomposición.

En seguida se encuentra la última sección, la cual llega hasta la descarga del horno y recibe la denominación de "zona de enfriamiento". Las paredes interiores del horno están formadas por una capa de 42cm. de espesor de ladrillo refractario, quedando el horno en su interior en forma rectangular con dimensiones de 2.05 x 2.65 m. Un metro antes de la boca de descarga, las paredes toman una inclinación hacia ella para guiar el material hacia la salida.

El material refractario de las paredes del horno es de dos tipos; en la zona de calcinación contiene 70% de alúmina con un punto de fusión de 1820-1835°C. En la zona de enfriamiento y precalentamiento se usa material refractario con un punto de fusión de 1745 - 1760°C. La boca de descarga tiene forma rectangular de 1.25 x 0.87 m. El horno se encuentra a una altura de 1.50 m. del nivel del suelo, distancia conveniente para descargar el material directamente sobre las vagónetas.

A una altura de 2 m de la boca de descarga se encuentran los hogares en donde se localizan los quemadores, los cuales tienen una dimensión de 0.28 x 0.25 m., por ellos penetra la boquilla del quemador; una por cada hogar, utilizando gas natural para la combustión. Los quemadores consisten en un tubo de 3/4 pulg de diámetro, que terminan en una boquilla con un pequeño orificio en la punta por donde sale el gas combustible. El quemador tiene adaptada una válvula para controlar la cantidad de gas para combustión.

3.1.1 Caso práctico tecnológicamente aplicado

Sustitución parcial de combustible tradicional por residuos combustibles en Rockwell Lime Company (Wisconsin, USA)¹

En 1983, la compañía norteamericana Rockwell Lime instrumentó un programa para hacer una prueba de quemado de residuos peligrosos. Esta prueba consistía en utilizar residuos peligrosos líquidos como combustible suplementario junto con carbón de petróleo. El residuo combustible sustituiría al gas natural como componente combustible.

Los objetivos primarios planteados para hacer el análisis del programa de sustitución parcial de combustible tradicional por combustible alternativo en un horno de cal eran:

- 1) Determinar los efectos causados por el carbón de petróleo o residuos peligrosos con respecto a las emisiones del horno.
- 2) Determinar el destino de los principales compuestos orgánicos peligrosos (POHC) y determinar su eficiencia de destrucción y remoción (DRE).
- 3) Determinar el destino de los compuestos clorados y metales pesados en el proceso del horno.
- 4) Determinar la concentración de SO₂ y NO_x, partículas, HCl, metales, hidrocarburos totales y monóxido de carbono en los gases de chimenea con el combustible base y con el residuo combustible.

¹ Duane R. Day et al, *Evaluation of Hazardous Waste Incineration in a Lime Kiln*, Environmental Protection Agency (EPA), National Technical Information Service, *Proceedings 10th Annual Research Symposium*, pp. 48-56.

- 5) Evaluar la operación del horno bajo las condiciones creadas por el quemado de residuos combustibles.

El combustible que utiliza normalmente el horno es una combinación de carbón de petróleo y gas natural. Durante las corridas de prueba que se efectuaron con residuos combustibles se tuvo que adaptar temporalmente una tubería de acero de una pulgada de diámetro en la tubería del quemador creando una flama donde se quemaba el residuo combustible en la parte interior y el carbón de petróleo exteriormente para dar el fuego al horno.

El combustible de residuos peligrosos fue almacenado temporalmente en un tanque de 20,000 lt. El residuo combustible para la prueba contenía un total de 3% de cloro para facilitar la evaluación de la destrucción de los compuestos clorados en el residuo combustible (tetracloroetileno y tricloroetileno).

Los resultados obtenidos de las pruebas de eficiencia de destrucción y remoción de los principales compuestos orgánicos peligrosos (POHC) se muestran en la tabla 3.1 donde se puede observar que el promedio de eficiencia de remoción y destrucción es del 99.9989%.

Los resultados de los análisis de la chimenea en particular para HCl, SO₂, NO_x, CO e hidrocarburos totales (THC) se resumen en la tabla 3.2, donde se comparan los resultados para el combustible tradicional y el combustible alterno.

La mayor parte del cloro (para cualquier condición de combustible base o combustible alterno) se encuentra en el horno tanto en la cal producto como en los recolectores de polvo. El azufre (para cualquier condición de combustible base o combustible alterno) entra al horno en el carbón de petróleo y permanece en el horno distribuido en la cal

producto (aproximadamente 9%), en los colectores de polvos (casi 27%), y en los gases de chimenea (cerca de 64%).

TABLA 3.1
CONCENTRACIÓN DE POHC Y EFICIENCIA
DE DESTRUCCIÓN Y REMOCIÓN (DRE)

POHC	CONCENTRACIÓN ALIMENTADA PROMEDIO % PESO	EFICIENCIA DE DESTRUCCIÓN Y REMOCIÓN %
MeCl ₂	0.11	99.983
MEK	2.69	99.998
CH ₃ CCl ₃	0.24	99.997
TCE	1.84	99.999
Perc	2.26	99.999
Tolueno	11.6	99.999
Promedio		99.9989

MEK = Metilacetona; TCE = Tricloroetileno; Perc = Tetracloroetileno

producto (aproximadamente 9%), en los colectores de polvos (casi 27%), y en los gases de chimenea (cerca de 64%).

TABLA 3.1
 CONCENTRACIÓN DE POHC Y EFICIENCIA
 DE DESTRUCCIÓN Y REMOCIÓN (DRE)

POHC	CONCENTRACIÓN ALIMENTADA PROMEDIO % PESO	EFICIENCIA DE DESTRUCCIÓN Y REMOCIÓN %
MeCl ₂	0.11	99.983
MEK	2.69	99.998
CH ₃ CCl ₃	0.24	99.997
TCE	1.84	99.999
Perc	2.26	99.999
Tolueno	11.6	99.999
Promedio		99.9989

MEK = Metiletilcetona; TCE = Tricloroetileno; Perc = Tetracloroetileno

TABLA 3.2
EMISIONES PROMEDIO DE LA CHIMENEA EN PRUEBAS
EFECTUADAS EN HORNOS DE CAL.

PARÁ- METRO Y UNIDAD	COMBUSTIBLE TRADICIONAL			COMBUSTIBLE ALTERNO		
	INTER- VALO	PROME- DIO	DESVIA- CIÓN ESTND.	INTER- VALO	PROME- DIO	DESVIA- CIÓN ESTND.
Partí- culas Kg / hr	0.66 a 1.1	0.9	0.2	0.68 a 1.4	1	0.3
HCl ppm	0.74 - 3.9	2	1.4	2.5 - 6.0	4.4	1.2
SO ₂ ppm	123 - 730	553	110	183 - 1924	596	2.40
NO _x ppm	306 - 460	386	49	288 - 552	446	64
CO ppm	10 - 4900	477	966	10 - 4540	599	1409
THC ppm	6.7 - 12.7	8.2	1.9	1.5 - 10	3.5	1.1

El análisis de metales se llevó a cabo por medio de un balance elemental de materia que se aplicó a 21 elementos. Los resultados de balance mostraron que no hay diferencias entre el combustible base y el combustible alterno en relación con la distribución de metales en el proceso del horno.

En la tabla 3.1 se observa para los principales compuestos orgánicos peligrosos (POHC), que el MeCl_2 , el MEK y el CH_2Cl_2 tienen una eficiencia de destrucción y remoción inferior al 99.9999% que disminuyen el promedio general de la eficiencia.

Las emisiones evaluadas entre el combustible base y el combustible alternativo se muestran en la tabla 3.2, en la cual se puede observar que los contaminantes listados HCl, NO_x y THC presentan una diferencia significativa entre los promedios del combustible base y el combustible alternativo. Estas grandes diferencias pueden obedecer a que el tiempo de residencia dentro del horno no sea el suficiente para lograr una mejor combustión. Para poder disminuir las emisiones sería necesario contar con un óptimo equipo de control ambiental lo cual implicaría una inversión adicional al proceso.

Por todo lo anterior, puede afirmarse que este proceso de fabricación de cal no puede considerarse como el óptimo para utilizar combustibles alternos.

3.2 Calderas industriales.

Existen una gran cantidad de residuos peligrosos con un calor de combustión suficientemente alto para poder ser destruidos en calderas industriales. Los beneficios de esta destrucción se manifiestan como un desplazamiento de los combustibles convencionales mediante el uso de calderas industriales existentes donde no se cuenta con incineradores; sin embargo, la destrucción de residuos peligrosos en calderas industriales no está debidamente regulada. La Agencia de Protección del Ambiente (EPA Environmental Protection Agency) de los E.E.U.U. es la responsable de discutir las pruebas acerca del potencial de destrucción de residuos peligrosos en calderas industriales. En México no se cuenta con esta tecnología; sin embargo, en diversas instalaciones industriales es común el empleo de residuos peligrosos como combustibles alternos sin tomar

en cuenta los resultados de las emisiones generadas y sin contar en la gran mayoría de los casos sin la autorización correspondiente por parte del Instituto Nacional de Ecología (INE).

Con la finalidad de obtener resultados representativos del potencial real industrial se han seleccionado algunas calderas y residuos para pruebas². Estas calderas tuvieron, a lo largo de la prueba, cierto intervalo de diseño y operación para su estudio: calderas con capacidades desde 1.1 kg/s hasta 32 kg/s de combustión de gas, aceite, carbón y madera, con cargas de 25 a 100% de la capacidad.

Las series de pruebas realizadas involucraron un combustible tradicional inicial para caracterizar la operación de una unidad y sus emisiones en ausencia de combustión del residuo. Para estas corridas la unidad cargada fue detenida constantemente para permitir la comparación de resultados respecto a la operación convencional.

La tabla 3.3 resume las pruebas realizadas; en los casos A y H se utilizó combustible sólido y la caldera se equipó con ciclones y precipitadores electrostáticos, respectivamente. En el caso G se quemaron hidrocarburos clorados sin ningún combustible convencional auxiliar y se equipó la caldera con 2 columnas agotadoras para la recuperación del HCl. Para extender el intervalo de características examinadas para la destrucción, los residuos en los casos E a H fueron alimentados con CCl₄ (tetracloruro de carbono), y en la mayoría de los casos, monoclorobenceno y tricloroetileno.

² Carlo Castaldini et al, *Field tests of industrial boilers cofiring hazardous wastes*, National Technical Information Service, *Proceedings of the Tenth Annual Research Symposium*, pp. 57-61.

TABLA 3.3
 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE
 CALDERAS SOMETIDAS A PRUEBA

Caso	Ca- paci- dad Kg/e	Comb. prima- rio	(% calor entr.) POHC*	Vapor alimen- tado Kg / e	% O ₂	Tiemp. resid. (s)	Calor ce- dido Kw/m ³
A	1.26	Madera residual	(40) aceite mineral	1.26	6 - 16	1.2	300
B	1.1	Gas	Agua residual	.26	4 - 6	0.8	750
C	29	Gas	(38) Fenol Cumeno	7.4	10	2	78
D	11	Aceite	(26) Xileno TCE	8.8	4 - 6	1.1	400
E	14	Gas	(33) MMA, CCl ₄ , MCB, TCE	7.2	6	0.8	470
F	7.6	Aceite	(10) Solvite. CCl ₄ , MCB, TCE	4	7 - 11	2	110

- Continuación-

Caso	Ca- paci- dad Kg/e	Comb. prima- rio	(% calor entr.) POHC*	Vapor alimen- tado Kg / e	% O ₂ %	Tiemp. resid. (e)	Calor ce- dido Kw/m ³
G	4	Ninguno	(100) CCl ₄ , Hidrocar- buros clorados	1.8	8	0.4	820
H	32	Carbón	(3) MeA, CCl ₄ , MCB 1,1,1-TCE	32	6	2	180

*POHC = Principales Compuestos Orgánicos Peligrosos

TCE = Tetracloroetileno, MMA = Metilmetacrilato

MCB = Monoclorobenceno, 1,1,1-TCE = 1,1,1-Tricloroetano, MeA = Metilacetato.

Nota: no se puede compara con límite alguno por no existir normatividad en México

En la tabla 3.4 podemos observar el promedio de eficiencia de destrucción y remoción de los principales compuestos orgánicos peligrosos administrados durante las pruebas. Estos resultados muestran un rango de remoción del 99.5 al 99.9%, lo cual indica una eficiencia bastante aceptable.

TABLA 3.4

TABLA DE RESULTADOS DE EFICIENCIA DE DESTRUCCIÓN Y REMOCIÓN DE LOS PRINCIPALES COMPUESTOS ORGÁNICOS PELIGROSOS

Principal Compuesto Orgánico Peligroso	Eficiencia de Destrucción y Remoción Masa promedio (%)	Eficiencia de Destrucción y Remoción Intervalo (%)
Tetracloruro de Carbono	99.998	99.97 - 99.999
Tricloroetileno	99.998	99.98 - 99.999
1,1,1 Tricloroetano	99.994	99.98 - 99.999
Clorobenceno	99.998	99.97 - 99.999
Fenol	99.999	99.5 - 99.999
Tolueno	99.998	99.90 - 99.999
Metilmetacrilato	99.991	99.95 - 99.999

En cuanto a metales pesados se refiere, los resultados indicaron que cuando la caldera se alimenta con combustible convencional se obtuvieron tan sólo valores representativos de emisiones de V, Ni, Zn, Pb, y Co; sin embargo, en la combustión de residuos de solventes (que contenían metales pesados), se encontraron en las emisiones 9 de 14 metales en cantidades mayores a 1 ppm.

Los metales analizados durante este estudio fueron:

Metal	¿Conc. > 1 ppm en alimentación ?	Metal	¿Conc. > 1 ppm en alimentación ?
Zinc	Si	Cromo	Si
Plomo	Si	Cobalto	Si
Vanadio	Si	Arsénico	No
Niquel	Si	Mercurio	No
Cadmio	Si	Antimonio	No
Cobre	Si	Selenio	No
Manganeso	Si	Estronico	No

Los intervalos de concentración de los metales que muestran un incremento al quemar residuos peligrosos en calderas son los siguientes:

Metal	Concentración (mg/m ³)
Zinc	> 1000
Plomo	> 1000
Cadmio	100-1000

-Continuación-

Metal	Concentración (mg/m ³)
Cromo	10-100
Cobre	10-100
Manganeso	10-100
Cobalto	10-100

En México, actualmente existe una Norma Oficial Mexicana (NOM-085 -ECOL-1994) para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. Esta norma establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. Las emisiones resultantes de los hornos de cal y de calderas industriales operando con combustión de residuos peligrosos como combustible alternativo, deberán apearse a los niveles señalados en dicha norma por ser la única fuente legal de referencia disponible para ello.

3.3 Hornos de fabricación de cemento.

Los hornos rotatorios utilizados en la producción del "clinker" del cemento Portland constituyen uno de los equipos de proceso de alta temperatura más importantes dentro de la industria en general.

Para evitar el sobrecalentamiento y consecuente debilitamiento del metal del que están fabricados los hornos, las corazas se fabrican de placa de acero rolada de diferente grosor, según sea el diámetro de

los mismos, y están recubiertos interiormente por un material refractario.

Los hornos rotatorios se instalan con cierto grado de inclinación con respecto al eje horizontal (pendiente) y se alimentan de mezcla cruda por la parte superior a un cierto nivel de llenado que depende de la pendiente y de la velocidad de rotación de los mismos; la mezcla cruda se quema utilizando quemadores de combustibles líquidos, gaseosos o sólidos pulverizados, para luego descargarse por la parte inferior de dichos hornos.

El llenado y la inclinación del horno la especifica el proveedor. La mayoría de los hornos rotatorios actuales operan con pendiente de entre 2 y 4% (Tang de 45 = 100% pendiente). Las pendientes más bajas permiten mayores niveles de llenado, pero requieren de mayores velocidades de rotación.

El tiempo de permanencia del material dentro del horno está estrechamente ligado con el nivel de llenado, con la velocidad de rotación y con el diámetro del horno.

Un horno rotatorio normal puede dividirse en las siguientes zonas de procesado:

1. Zona de secado: 33% de la longitud total de horno. La temperatura del material alcanza casi 120°C para eliminar humedad en caso de proceso húmedo.
2. Zona de precalentamiento: 14% de la longitud total del horno. La temperatura del material sube de 100 a 550°C para el desprendimiento del agua del componente arcilloso de la mezcla cruda.

3. Zona de calcinación: 25% de la longitud total del horno. La temperatura del material sube de 550 a 1100°C para la disociación del carbonato de calcio.
4. Zona de sinterización o quemado: 20% de la longitud total del horno. La temperatura del material sube de 1100 a 1450°C para la disociación del carbonato de calcio a cal ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{O}_2$).
5. Zona de enfriamiento: 5% de la longitud total del horno. La temperatura del material baja de 1450 a 1370°C. Se lleva a cabo una combinación de la cal con los minerales arcillosos, esto es, la formación de los cuatro minerales principales del "clinker".

Cabe aclarar que no hay límites estrictos entre las zonas del horno, dado que las temperaturas de los gases del material y del refractario son difíciles de asegurar y el proceso de quemado del "clinker" en los hornos rotatorios se subdivide en dos sistemas térmicos llamados Sistema Térmico Principal y Sistema Térmico Subsidiario. El primero comprende las zonas de calcinación, sinterización y enfriamiento y el segundo, las zonas de secado y precalentamiento.

Los hornos rotatorios para la fabricación del "clinker" pueden utilizar para su operación combustibles sólidos pulverizados, líquidos atomizados y gases. Los combustibles sólidos se componen de constituyentes orgánicos que contienen carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.

Los componentes combustibles son el carbón, hidrógeno y azufre; mientras mayor sea el porcentaje presente mayor es el poder calorífico; aun cuando no es deseable la presencia de azufre porque al quemarse forma SO_2 que luego se combina con el vapor de agua para formar H_2SO_3 (que ataca las partes metálicas del horno por ser altamente corrosivo), es preferible una pequeña cantidad de azufre

porque reacciona con los álcalis de la mezcla cruda para formar sulfatos alcalinos que salen del horno junto con el "clinker", reduciendo así la cantidad de álcalis en el sistema.

Para asegurar la operación económica del horno rotatorio el poder calorífico del combustible sólido debe promediar alrededor de 7,000 kcal/kg, pues valores menores aumentan el consumo específico del calor para el quemado del "clinker" y disminuyen simultáneamente el rendimiento específico del horno.

Por lo que respecta a los combustibles líquidos la propiedad más importante que tienen es su facilidad para quemarse y la viscosidad, su característica más significativa. Su composición química consiste en 85 a 90% de carbón, 5 a 10% de hidrógeno y oxígeno, 3 a 4% de nitrógeno y azufre, el cual es resultado de la presencia de varios cientos de hidrocarburos que les confieren un poder calorífico variante de 8,500 a 10,000 kcal /kg.

Las altas temperaturas necesarias para la elaboración del cemento, de hasta 1,650°C en la zona de "clinkerización" de los hornos, hacen que esta industria sea una importante consumidora de energéticos, tanto térmicos como eléctricos, dependiendo su consumo, según el país de que se trate, del tamaño de su industria, de la edad de sus fábricas, y de los procedimientos de trabajo que se sigan en ellas, por lo que, en algunos países el costo de consumo de energéticos llega a representar hasta 50% del costo total de producción del cemento¹⁰.

¹⁰ Mogens H. Fog y Kishore L. Nadkarni, Energy efficiency & fuel substitution the de cement industry with emphasis on developing countries, A World Bank Technical Paper, p. xv.

A nivel internacional se asume que la producción de una tonelada de "clinker" requiere 125 kg de combustóleo, o su equivalente, y que el consumo específico de electricidad es de 125 kWh por ton. de cemento⁴ (La proporción clinker-cemento es 1: 1.04).

Del mismo modo se asignan los siguientes valores de intervalo de consumo energético para las diversas etapas del proceso de fabricación del cemento:

ETAPA DEL PROCESO	INTERVALO DE CONSUMO
* Extracción y trituración (electricidad)	8.5 a 70 kcal/ kg. ck.
* Secado (combustibles)	0 a 335 kcal / kg. ck.
* Molienda Inicial (electricidad)	8.5 a 200 kcal / kg. ck.
* Horno (electricidad)	28 a 175 kcal / kg. ck.
	780 a 2800 kcal /kg. ck.
* Molienda Final (electricidad)	75 a 206 kcal/kg. ck.

Es necesario recalcar que a pesar de no existir en los gases de escape de los hornos ninguna emisión química que se catalogue como contaminante atmosférico, se estima que un 15% del costo total de

⁴ Carlos Mendoza Ramírez, " Consideraciones básicas para la operación de un horno rotatorio de cemento Portland, Tesis de licenciatura, Facultad de Química UNAM, 1991, p. 21.

una planta nueva, corresponde a equipo anticontaminante, principalmente de captación de polvos.

Por lo que respecta al consumo de energéticos para la producción de cemento, se estima que éste es del orden del 5% de las ventas nacionales de gas natural, del 7% de las de combustóleo, y del 4% de la generación total de energía eléctrica del país⁵.

3.3.1 Caso práctico tecnológicamente aplicado

Sustitución parcial de combustible por residuos peligrosos en la compañía de cemento Medusa (Pennsylvania USA)⁶.

Debido a las condiciones de operación ya mencionadas, varias plantas productoras de cemento han realizado numerosas pruebas sustituyendo el combustible convencional por residuos peligrosos y han obtenido resultados muy satisfactorios. Por ejemplo: la Compañía de Cemento Medusa (al norte de Pittsburgh) ha quemado, a lo largo de varios años, una gran variedad de residuos como combustible; las disposiciones tomadas durante las pruebas de las chimeneas, fueron diseñadas para apreciar que también el horno podría destruir los componentes de los residuos peligrosos del combustible mediante mediciones de los principales compuestos orgánicos peligrosos removidos de la emisión de partículas, de hidrocarburos totales, de ácido clorhídrico, de óxidos de nitrógeno, de monóxido de carbono, de óxidos de azufre, así como de la emisión de metales pesados. Durante la prueba se eligieron dos de los compuestos orgánicos peligrosos más difíciles de quemar: tetracloruro de carbono y 1,1,1 tricloetano,

⁵ Carlos Mendoza Ramírez, *ibid*, p. 23.

⁶ William H. et al, *Experiences with burning waste, in Rock products*, April 1991, pp. 36-46.

con un contenido de calor de 240 kcal/kg y 1,990 kcal/kg respectivamente así como un tercer compuesto, el tolueno, debido a su gran estabilidad ante el calor y a su frecuente presencia en las corrientes de residuos.

De esta prueba se obtuvo, al menos, un 99.99% de eficiencia de remoción y destrucción para los dos primeros compuestos y de 99.98% para el tolueno. Sin embargo, las emisiones de tolueno se encuentran en cantidades significativas aun cuando se quema sólo carbón.

La Compañía Medusa aplicó tres procedimientos analíticos para medir las emisiones de HCl, obteniendo resultados muy similares que con el combustible convencional. Las emisiones de SO₂ y NO_x mostraron un decremento significativo y a partir de esto, dicha compañía comenzó a introducir el uso de residuos como combustible en sus demás hornos, estandarizando las especificaciones óptimas para no tener problemas en la operación y obtener un sistema balanceado.

La compañía asegura que sus tres hornos son capaces de destruir y recuperar energía de aproximadamente cuatro millones de litros por mes de residuos peligrosos, lo cual contribuye en gran medida a su economía al tiempo que provee de una segura y efectiva destrucción de residuos peligrosos.

CAPÍTULO IV

HORNOS DE CEMENTO: EL PROCESO ÓPTIMO.

El cemento Portland es un material finamente pulverizado que, ya sea solo o mezclado con diversos materiales como arena, grava, asbesto, etcétera, al añadirle agua tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua, y forma una masa endurecida, es decir, una clase de cemento hidráulico. Este proviene de la pulverización fina del producto obtenido por la calcinación o fusión incipiente de una mezcla íntima y debidamente proporcionada desde el punto de vista químico de materiales calizos y arcillosos ("clinker"), sin más adición posterior que yeso natural (sulfato de calcio dihidratado), el cual se emplea para regular la acción química del cemento con el agua, controlando así el tiempo de fraguado.

El cemento Portland está constituido de materiales arcillosos y calizos los cuales son triturados, mezclados y convertidos en polvo fino. La composición de estas mezclas debe mantenerse constante dentro de ciertos límites, por lo que un error tiene como resultado un cemento de calidad inferior. El mezclado y la molienda pueden llevarse a cabo de dos maneras diferentes: en condiciones secas (proceso vía seca) o adicionando agua (proceso vía húmeda). Es esencial vigilar el método de preparación de las mezclas, su proporción, la finura del polvo y el intermezclado antes de introducirlas en el horno.

4.1 Química del cemento

Los cementos Portland están compuestos principalmente de cuatro óxidos básicos: calcio, CaO ; silicio, SiO_2 ; aluminio, Al_2O_3 ; y fierro, Fe_2O_3 ; y no son simples mezclas de los mismos, sino mezclas de combinaciones de dichos óxidos.

Existen diversos tipos de cemento Portland que han sido clasificados por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) como sigue:

Tipo I	Portland normal
Tipo II	Portland modificado
Tipo III	Portland de fraguado rápido o de fraguado extra rápido
Tipo IV	Portland de bajo calor
Tipo V	Portland resistente a los sulfatos
Tipo IS	Portland de escoria de alto horno
Tipo P e IP	Portland puzolana, blanco y cemento mortero o de albañilería

Las composiciones químicas típicas de los diversos tipos de cemento Portland se especifican en la tabla (4.1).

TABLA 4.1
COMPOSICIONES QUÍMICAS TÍPICAS DE VARIOS CEMENTOS (%)

TIPO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
I	21.3	6.0	2.7	63.2	2.9	1.8
II	22.3	4.7	4.3	63.1	2.5	1.7
III	20.4	5.9	3.1	64.3	2.0	2.3
IV	24.3	4.3	4.1	62.3	1.8	1.9
V	25.0	3.4	2.8	64.1	1.9	1.6
Blanco	25.5	5.9	0.6	65.0	1.1	0.1

4.2 Etapas del proceso de fabricación.

Existen dos métodos para la fabricación de los cementos Portland: seco o húmedo. En ambos, el proceso se inicia con la explotación de las canteras de materias primas (materiales calizos y arcillosos), su extracción, y su transporte a la fábrica donde se procesa de la siguiente manera:

TRITURACIÓN: Las materias primas se trituran en máquinas que las reducen a un tamaño máximo de 4 cm.

PRE-HOMOGENEIZACIÓN: Se apila el material triturado convenientemente para uniformar la composición química del conjunto.

MOLIENDA Y SECADO: Se reduce el contenido de humedad del material hasta 4.2% , y a su vez se muele en molinos de bola. Por medio de un separador de aire se separa un polvo muy fino llamado "crudo" o "mezcla cruda" que ha sido previamente dosificada.

HOMOGENEIZACIÓN: Con la finalidad de garantizar un carga uniforme, la mezcla cruda se envía a los silos de crudo donde se homogeneiza hasta obtener una composición química siempre igual.

CALCINACIÓN: El material se transfiere de los silos de crudo, al sistema de calcinación (hornos rotatorios simples o arreglados con equipos intercambiadores de calor). Este sistema constituye la parte fundamental del proceso pues en él se llevan a cabo las reacciones químicas que dan origen a los compuestos constituyentes del cemento. Mediante tratamiento térmico adecuado se lleva la mezcla cruda a un estado de semifusión durante el cual se forman aglomerados de forma aproximadamente esférica que contienen los cuatro compuestos principales del cemento Portland llamado "clinker".

La calcinación es la etapa más importante del proceso, ya que de ésta dependen tanto la calidad del producto como la economía del mismo.

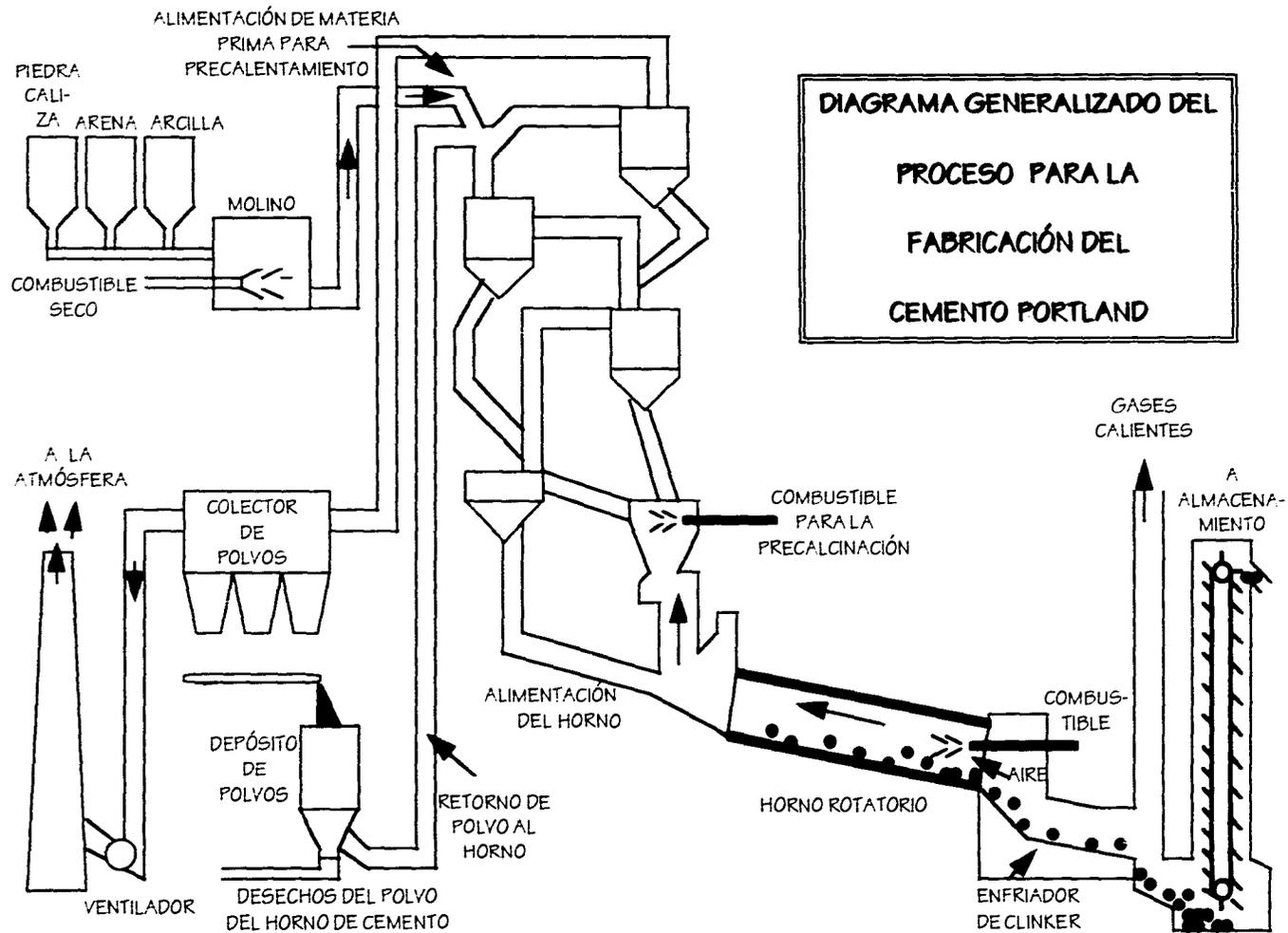
ENFRIAMIENTO: Una vez calcinado el "clinker" se enfría en equipos especiales y se almacena en el patio de materiales.

MOLIENDA DEL CEMENTO: Al "clinker" se le dosifica yeso a una finura muy elevada. Esta mezcla pasa a los molinos de cemento para obtener el cemento Portland, con lo que concluye el proceso y sólo resta transportarlo a los silos de almacenamiento donde se muestrea para realizar las pruebas de control de calidad previas a su envase y venta.

La diferencia entre el proceso seco y el húmedo consiste básicamente en que la arcilla no se tritura, sino que se descarga en un molino de rastrillos que la desmenuza y la mezcla con agua para producir una lechada bastante fluida, la cual se dosifica junto con la caliza previamente triturada; posteriormente, se alimenta a los molinos de crudo donde se agrega agua para facilitar la molienda, el manejo, el mezclado y el control de los materiales. De aquí pasa a unos tanques correctores, después a otros mezcladores de donde pasa al horno para llevar a cabo el secado y el desmenuzamiento de los aglomerados de polvo crudo mediante un sistema de cadenas que se mueven lentamente conforme gira el horno.

Los pasos posteriores en la fabricación son iguales a los que se siguen en el proceso vía seca.

El diagrama generalizado del proceso para la fabricación del cemento Portland utilizando la vía seca se muestra en la figura 4.1.



4.3 Características que hacen del proceso del cemento el proceso óptimo.

Como ya se mencionó, la etapa preliminar en la producción del cemento es la formación del "clinker" que requiere temperaturas de hasta 1,650°C; esta es una de las razones por las cuales el costo del combustible constituye aproximadamente 50% de los costos de producción del cemento; por lo que el uso de combustibles económicos es un factor fundamental en la economía de la producción del cemento.

Incluso cuando el incremento en el precio de los combustibles es una razón muy atractiva para utilizar residuos peligrosos como combustible alternativo, no es la única consideración significativa. Las sustancias nocivas y los residuos producidos durante la destrucción térmica pueden quemarse completamente sin ocasionar un deterioro ambiental o un deterioro en el producto como sucede en el caso del cemento; por el contrario, tanto las sustancias inertes como algunos compuestos ácidos que se encuentran en el combustible se incorporan al "clinker" o se neutralizan.

Los principales residuos de interés para utilizarse como combustible alternativo son los siguientes:

- 1) Aquéllos con un valor calorífico suficientemente alto.
- 2) Aquellos constituyentes inertes que en ciertas cantidades no presenten efectos adversos en la calidad del "clinker", y
- 3) Aquellos compuestos tóxicos volátiles que pueden ser absorbidos por la materia prima e incorporados en el "clinker".

1 Mogens H. Fog op cit. p.xv.

Con la finalidad de determinar el comportamiento de los metales cuando se reemplaza el combustible convencional por residuos peligrosos, Southdown Portland Cement Co. en Houston, Texas ha desarrollado diversos estudios² en los cuales los metales que alimentan al horno varían al menos en un orden de magnitud. Dichos estudios revelaron claramente qué porción de los metales quedó envuelta en el "clinker" y polvo así como la parte que fue emitida.

El horno en el que se realizaron las pruebas tiene una capacidad de 2,350 ton/día, utiliza como combustible primario carbón pulverizado, e introduce tetracloruro de carbono y triclorobenceno como principales compuestos orgánicos peligrosos (POHC) por ser difíciles de destruir y por tener gran estabilidad térmica. Estos compuestos se agregaron al combustible en cantidades establecidas para que pasaran a través de las zonas de sinterización y calcinación del horno rotatorio. Al final de esta prueba, se mostró una eficiencia de destrucción y remoción (DRE) del 99.999% para el tetracloruro de carbono y del 99.996% para el triclorobenceno.

Estos resultados pueden sustentar claramente que la emisión de orgánicos no es un fundamento válido para no utilizar residuos peligrosos como sustituto de combustibles fósiles en hornos de cemento. También se realizaron extensas investigaciones acerca del comportamiento de los metales en el horno. Estas investigaciones revelaron que la mayoría de las trazas de metales en el horno quedaban ligadas en el "clinker" (sin ocasionar alteraciones en la calidad del producto) y unas cuantas en los polvos descargados que pueden regresarse a la alimentación del horno. En general un 99.9% del total alimentado de los principales compuestos y trazas quedaban atrapados en el producto.

² Michael Von Seebach y J. Bruce Tompkins, Metales emisiones are predictable, en Rock Products, April 1991, pp. 31-35.

La tabla 4.2 muestra el porcentaje de retención de algunos metales analizados utilizando como combustible residuos líquidos peligrosos. La retención de los metales en el sólido es característica de cada metal, sin presentar alguna correlación con respecto a su volatilidad.

TABLA 4.2

PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE METALES CON RESPECTO A LA ALIMENTACIÓN

Metal	Entrada lb/hr	% Retención
Cr	0.5642 - 10.1974	99.8553 ± 0.3990
Pb	1.5761 - 42.2842	99.8531 ± 0.2939
Ba	33.1177 - 75.9640	99.8781 ± 0.2939
Cd	0.0864 - 0.3945	>99.5550 ± 0.4418
As	0.0151 - 6.5910	>99.8868 ± 0.2916
Be	0.0003 - 0.7172	>99.8681 ± 1.3278
Se	0.0072 - 1.3410	>95.4002 ± 1.7779
Ag	0.0439 - 0.4975	± 99.842 ± 0.1839
Ni	1.9490 - 5.0261	>99.9574 ± 0.0108
Sb	0.3532 - 0.6640	>99.769 ± 0.0785
Zn	9.1751 - 35.8034	99.7869 ± 0.2598
V	4.9594 - 31.3130	>99.9922 ± 0.0007

Las pruebas de retención de metales se elaboraron a diferentes niveles de cloro alimentado (dentro de niveles que no excedieran el intervalo normal de operación), mostrando que el promedio de retención de metales es independiente del cloro alimentado, como se ilustra en la tabla 4.3.

TABLA 4.3
PRUEBAS DE RETENCIÓN DE METALES

Metal	% Retención a 100 lbs de Cl / hr	% Retención a 180 lbs de Cl / hr
Cd	99.55	99.87
Pb	99.85	99.98

Esta consideración del cloro presente es muy importante debido a que las corrientes residuales que pueden utilizarse como combustible, a menudo contienen variados niveles de cloro.

La retención de metales se derivó de un balance de entrada-salida de metales; sin embargo, para cuantificar las emisiones, éstas se midieron por separado tanto en el colector de partículas como directamente de la chimenea, dando ambos procedimientos resultados muy similares y demostrando que ninguno de los metales analizados se emite como metal libre o vapor (como sucede en el caso de la combustión de residuos en las calderas).

El intervalo de temperatura de operación del controlador de contaminación no permite temperaturas de gases suficientemente altas para que los metales existan en forma vaporizada.

La tabla 4.4 muestra el porcentaje de metales emitidos. En algunos casos donde el valor está por debajo de los límites de detección se utilizó la aproximación más representativa. Cabe mencionar que estas pruebas se realizaron en seis hornos y como se

esperaba, no hubo diferencia significativa en la emisión de metales al quemar residuos peligrosos y carbón.

En esta tabla no se tabulan los valores estudiados para el mercurio y el talio porque se consideraron metales volátiles que requerían atención especial.

Los resultados para estos metales se muestran en la tabla 4.5.

TABLA 4.4
PORCENTAJE DE EMISIÓN DE METALES CON RESPECTO A LA ALIMENTACIÓN

Metal	Entrada lbs / hr	Emisión %
Cr	0.5642 - 10.1974	0.128
Pb	1.5761 - 42.2842	0.167
Ba	33.1177 - 75.9640	0.030
Cd	0.0864 - 0.3945	0.440
As	0.0151 - 6.5910	0.022
Be	0.0003 - 0.7172	0.114
Se	0.0072 - 1.3410	0.298
Ag	0.0439 - 0.4975	0.163
Ni	1.9490 - 5.0261	0.048
Sb	0.3532 - 0.6640	0.266
Zn	9.1751 - 35.8034	0.220
V	4.9594 - 31.3130	0.004

TABLA 4.5
 PORCENTAJE DE RETENCIÓN Y EMISIÓN DE METALES VOLÁTILES

Me- tal	Entrada (lbs/hr)	Retención (%)	Emisión (%)
Hg	0.0047 - 0.0938	>61.3 ± 32.5	10 - 90
Tl	0.0180 - 0.7357	90.122± 10.711	10 - 20

Los resultados presentados en las tablas anteriores muestran que un análisis apropiado de residuos así como el manejo seguro son factores importantes que deben dirigirse ordenadamente y con ello lograr un uso satisfactorio de estos residuos como una alternativa para hornos de cemento.

El "thinner" de pinturas, solventes, enjuagues de solventes de tintas e imprentas, químicos de industrias farmacéuticas, químicos de manufactura, aceites residuales y otros flamables, se pueden usar para preparar combustibles de alta calidad para hornos de cemento.

El primer componente de un combustible típico de residuos peligrosos de estas fuentes son el xileno, tolueno, mezcla alifática de hidrocarburos, acetona y metil-etil-cetona. Una gran variedad de compuestos orgánicos, incluyendo aldehidos, ésteres, alcoholes, cetonas, compuestos aromáticos, fenoles, aminas, amidas, éteres, nitrilos y otros compuestos orgánicos halogenados se encuentran comúnmente en mezclas de combustibles alternos elaborados a base de residuos peligrosos.

En la tabla 4.6 se mencionan algunos de los Principales Compuestos Orgánicos Peligrosos (POHC) que pueden utilizarse en los

E.E.U.U como fuente de energía, con su respectivo poder calorífico y estado físico a 25°C.

Los materiales del grupo I tienden a ser etilenos altamente halogenados, bencenos, y etanos. En el grupo II, materiales menos halogenados y fondos de procesos de producción, y el grupo III contiene principalmente solventes no halogenados.

La elección y aceptación de compuestos depende principalmente del potencial y del criterio de seguridad. Casi sin excepción cualquier compuesto orgánico puede ser completamente destruido a elevadas temperaturas, apropiadas a la operación de hornos de cemento.

TABLA 4.6
PRINCIPALES COMPUESTOS ORGÁNICOS PELIGROSOS
Y SU PODER CALORÍFICO

PCOP	ΔH_c (Kcal/g)	Estado físico 25°C
Grupo I		
Triclorofluorometano	0.11	Líquido
Tetraclorometano	0.24	Líquido
Hexacloroetano	0.46	Sólido
Cloroformo	0.75	Líquido
Tetracloroetileno	1.19	Líquido
Diclorometano	1.70	Líquido
Tricloroetileno	1.74	Líquido
Tricloroetano	1.99	Líquido
Hexaclorobutadieno	2.12	Sólido
Pentaclorofenol	2.19	Sólido
Dicloroetano	3.00	Líquido
Triclorobenceno	3.40	Sólido
2,4 diclorofenol	3.81	Sólido

-Continuación-

PCOP	ΔH_c (Kcal/g)	Estado físico 25°C
Grupo II		
Cloruro de Vinilidina	4.45	Líquido
Diclorobenceno	4.57	Líquido
Anhidrido Ftálico	5.29	Sólido
Nitrobenceno	5.50	Líquido
Diisocianato Tolueno	5.92	Sólido
Clorobenceno	6.60	Líquido
Grupo III		
Acilonitrilo	7.37	Líquido
Fenol	7.78	Sólido
Piridina	7.83	
Acilonitrilo	7.93	
Metil etil cetona	8.07	Líquido
Cresol	8.18	Líquido
Naftaleno	9.62	Lodo
Benceno	10.03	Sólido
Tolueno	10.14	Líquido

Los grupos a los que se refiere la tabla se agrupan por su intervalo de poder calorífico de la siguiente manera:

Grupo	ΔH_c Intervalo (kcal/kg)
I	0 - 0.00399
II	0.004 - 0.00699
III	0.007 - 0.010+

4.4 Incineradores

La incineración fue desarrollada hace gran número de años con la finalidad de disponer o tratar diversos tipos de materiales residuales. Recientemente se ha aplicado el proceso de incineración como una solución viable al problema de los residuos peligrosos.

La incineración es un proceso muy versátil. Puede considerarse como un proceso generador de energía si se convierte en vapor o se emplea en otro uso benéfico. Puede considerarse como un proceso reductor de volumen en el cual gran cantidad de componentes elementales de materiales orgánicos, incluyendo los más comunes (carbón, hidrógeno, oxígeno, cloro, azufre), se convierten total o parcialmente a forma gaseosa dejando únicamente volumen inorgánico no combustible. La incineración también es una opción viable para detoxificar materiales. Si la toxicidad o alguna otra propiedad peligrosa se da en la estructura de la molécula orgánica, es posible deshacerse de esta propiedad por medio de la destrucción de la estructura de la molécula orgánica mediante una oxidación o aplicando calor suficiente. Algunas otras ventajas de la incineración son:

- a) El quemado de residuos y combustibles se lleva a cabo de una manera controlada.
- b) Es aplicable a la mayoría de los residuos orgánicos y puede ser escalada para aceptar grandes volúmenes.
- c) No se requiere de gran extensión de tierra para su instalación.

Asimismo, algunas desventajas de la aplicación de este proceso son las siguientes:

- a) El equipo tiende a ser más costoso y complicado de operar que muchas otras alternativas.
- b) No siempre es el último paso para la disposición de los residuos; las cenizas restantes pueden ser o no tóxicas, por lo que en algunos casos es necesario un tratamiento posterior antes de su disposición final.
- c) Es necesario el uso de alguna tecnología para el control de la contaminación del aire, los gases y las partículas producidas por la combustión porque pueden ser peligrosas para la salud o dañinas para el personal.

La decisión de incinerar un residuo determinado depende en primer lugar de la ventaja ambiental que daría la incineración comparada con otras alternativas y, en segundo lugar, del costo relativo que implica el uso de este proceso.

Muchos de los incineradores usados para quemar materiales peligrosos se encuentran instalados en plantas industriales en donde el residuo se genera o en centrales privadas que facilitan la disposición. En general, los incineradores son instalados sólo por grandes compañías que producen cantidades considerables de materiales incinerables que justifican el costo que implica la instalación y mantenimiento de un incinerador. Cuando el volumen de residuos peligrosos que genera alguna compañía es pequeño, la alternativa viable para la disposición final de los mismos consiste en recurrir a las centrales de incineración, las cuales brindan este servicio a costos moderados.

En Europa, debido a cuestiones geográficas y de extensión territorial, la incineración se realiza con mucho más cuidado que en Estados Unidos. Suiza cuenta con cuatro incineradores regionales para residuos industriales y algunos constituyentes peligrosos de los

residuos municipales. Las leyes suizas relativas a emisiones de la incineración son mucho más estrictas que las leyes correspondientes en Estados Unidos, requiriendo de monitoreo de partículas, oxígeno, NOx, HF y HCl. En Biebesheim, Alemania Occidental existen dos incineradores de residuos (el primero fue construido en 1917) los cuales incineran 50 millones de toneladas de residuos al año. Las leyes de Alemania Occidental prohíben la disposición en la tierra de sustancias orgánicas volátiles, las cuales deben incinerarse.

La selección de la tecnología para la destrucción segura y eficiente del residuo depende de éste y de las características de incineración que se requieran. Asimismo, para la selección apropiada del incinerador es importante tomar en cuenta su diseño, el equipo de control de contaminación a usar, la temperatura de la zona de combustión, el tiempo de residencia del gas, la atomización del residuo y la turbulencia.

El equipo de control de contaminación que es necesario adicionar a cualquier incinerador está compuesto generalmente por un controlador de emisiones gaseosas y partículas. El equipo de control de contaminación se localiza corriente abajo de cualquier equipo de recuperación de energía y puede estar constituido por uno o más de los siguientes componentes:

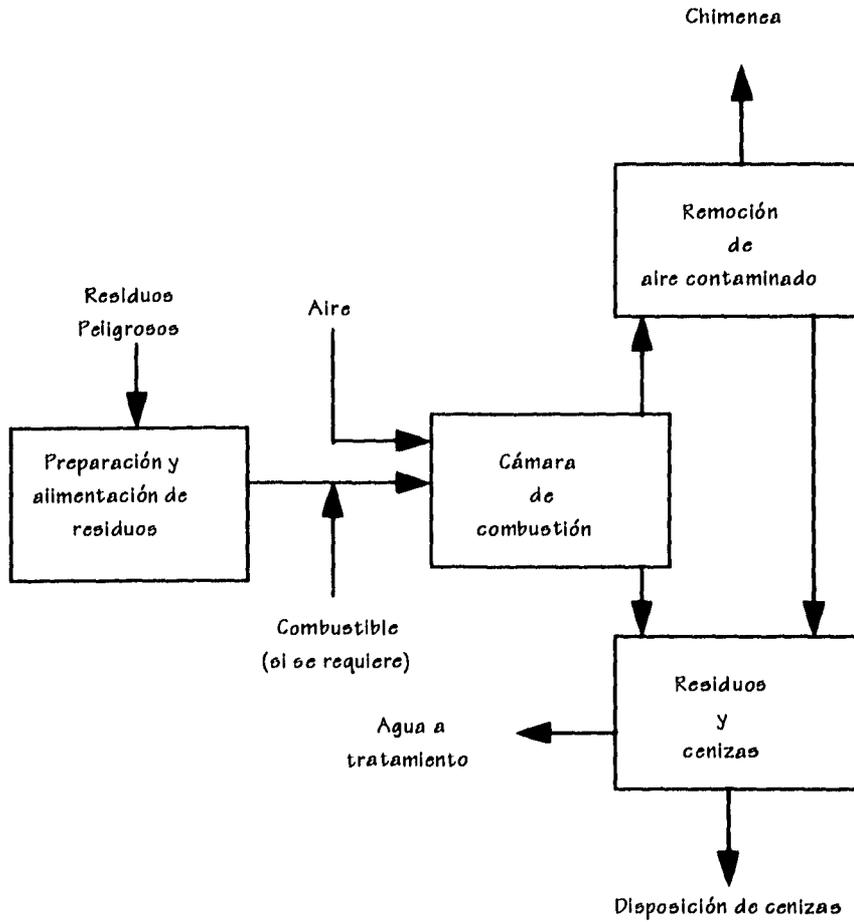
- Cámara de lavado
- Colector de partículas:
 - * Agotador Vénturi
 - * Colector del tipo de bolsas
 - * Precipitador electrostático
 - * Ciclón
 - * Agotador de ionización húmeda

En general se puede considerar como un incinerador a cualquier equipo de proceso usado térmicamente para descomponer residuos peligrosos.

En la figura 4.2 se muestra un sistema de incineración de residuos peligrosos; estos sistemas se dividen generalmente en cuatro componentes básicos.

Los incineradores se clasifican de acuerdo con la cámara de combustión primaria. Entre los principales diseños están los hornos rotatorios, incineradores de inyección de líquidos e incineradores de lecho fluidizado. Todos los incineradores deben estar equipados con un puerto de inyección de líquidos o un atomizador, además de otros tipos de alimentación de residuos.

FIGURA 4.2. PRINCIPALES COMPONENTES DE UN SISTEMA DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS



ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

4.4.1 Descripción de los principales tipos de incineradores

- Incineradores de horno rotatorio

Principios del proceso: Está constituido por un cilindro que rota lentamente montado con una ligera pendiente. La caída de los materiales dentro del horno da la eficiencia de destrucción de los residuos. Esta tecnología puede adaptarse al proceso de la cal.

Aplicaciones: Gran cantidad de residuos orgánicos; sólidos y lodos; líquidos y gases inflamables haciendo uso de las boquillas auxiliares.

Temperatura de combustión: 810 - 1650°C (1500 - 3000°F)

Tiempo de residencia: Varía de segundos a horas (líquidos y gases -- tiempos cortos-- sólidos -- tiempos mayores--)

- Incineradores de inyección de líquidos

Principios del proceso: Se conforma de un recipiente vertical u horizontal y un atomizador de residuos que contiene boquillas para incrementar el grado de vaporización.

Aplicaciones: Está limitado a líquidos o lodos (750 SSU o menores para su correcta atomización)

Temperatura de combustión: 650 - 1650°C (1200 - 3000°F)

Tiempo de residencia: De 0.1 a 1 segundo

- Incineradores de lecho fluidizado

Principios del proceso: Los residuos son inyectados a una cama agitada y caliente de partículas granuladas inertes; el calor es

transferido entre el material de la cama durante la combustión del residuo.

Aplicaciones: Gran cantidad de residuos orgánicos; es ideal para líquidos, aunque también se manejan sólidos y gases.

Temperatura de combustión: 750 - 870°C (1400 - 1600°F)

Tiempo de residencia: Segundos para gases y líquidos; tiempos mayores para sólidos.

4.4.2 Residuos incinerables

En el mejor de los casos, los residuos incinerables son predominantemente materiales orgánicos. Los residuos con poder calorífico superior a 4,500 kcal/kg se incineran bien; aquellos residuos con poder calorífico inferior a 3,000 kcal/kg no son buenos para la combustión. En algunos casos de incineración de residuos que no pueden quemarse solos es preferible incluir en la combustión un combustible auxiliar.

Anualmente se producen grandes cantidades de combustible que crean subproductos apropiados para la incineración. Muchos de estos subproductos son solventes degradados y de limpieza incluyendo compuestos clorados y no clorados así como mezclas de líquidos orgánicos con agua. Alrededor de 1980 los compuestos incinerados más frecuentes en Estados Unidos eran¹⁶: metanol, acetonitrilo, tolueno, etanol, acetato de amilo, acetona, xileno, metil-etil-cetona, ácido adiposo y acetato de etilo.

¹⁶ Stanley E. Manahan, op cit, p.317.

Para determinar de la incinerabilidad es importante conocer los contenidos de material inorgánico, agua y elementos heterorgánicos en los residuos líquidos.

Un estudio realizado por la EPA en 1983⁴ acerca de los tipos de residuos peligrosos que se incineran mostró que 44% de éstos están constituidos por solventes no halogenados gastados, y residuos orgánicos corrosivos y reactivos. El ácido cianhídrico (altamente tóxico) es también un contribuyente importante de las corrientes de residuos así como el acrilonitrilo y agua contaminada. Comúnmente, la incineración de residuos industriales incluye pesticidas, plaguicidas y aceites.

Gran cantidad de compuestos químicos se encuentra en los residuos que se queman en incineradores de residuos peligrosos. Entre ellos se encuentran: acetona, cloruro de metileno, tetracloruro de carbono, tricloroetileno, percloroetileno, cloroformo, clorometano, clorobenceno, diclorobenceno, tolueno, orto-xileno, cumeno, fenol, anilina, nitrobenceno, metil-etil-cetona, difenilamina, fosgenos y freón 113.

4.4.3 Caracterización de los residuos incinerables.

La eficacia de incineración, la capacidad del incinerador, el control de las emisiones, la rentabilidad y la protección del equipo de incineración así como del personal requieren de una caracterización minuciosa de residuos antes de su incineración. Las propiedades que deben caracterizarse incluyen propiedades físicas y químicas. Algunas de las propiedades más importantes a caracterizar en los residuos se muestran en la tabla 4.7.

⁴ Stanley E. Manahan, *ibid*, p.318

Niveles importantes de metales tóxicos como plomo, cadmio o arsénico en los residuos deben detectarse antes de la incineración. La incineración de algunos metales requiere de cuidados especiales como medidas de control de la contaminación del aire o clasificación de las cenizas como residuos peligrosos que pueden hacer la disposición excesivamente cara.

En el caso de los metales pesados, éstos no se destruyen por la combustión y se pueden encontrar distribuidos como se muestra en la tabla 4.8.

Una de las mayores desventajas de la incineración la constituyen los polvos colectados de los incineradores que deben de ser tratados como residuos peligrosos por su gran potencial de riesgo y toxicidad.

TABLA 4.7
PROPIEDADES IMPORTANTES DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS

PROPIEDADES	IMPORTANCIA
Morfología, densidad, reología.	Características de la alimentación
Poder calorífico	Balance de energía en la cámara de combustión necesario para el combustible auxiliar.
Carbón, hidrógeno, oxígeno, agua	Poder calorífico, combustibilidad.
Organohalogenados	Requieren de altas temperaturas para su destrucción, emisión de productos halogenados (particularmente HCl)

- Continuación-

PROPIEDADES	IMPORTANCIA
Azufre orgánico, nitrógeno y fósforo	Azufre, nitrógeno y emisiones de óxidos de fósforo
Cenizas	Cantidad y peligrosidad de residuos no quemados
Tamaño de las partículas de ceniza, características de fusión	Escoriación y taponamiento de equipo
Elementos de transición peligrosos incluyendo metales pesados	Peligro al desprenderse de metales pesados y otros elementos tóxicos durante la incineración y para la ceniza residual
Sales	Características de las cenizas, daño a los ladrillos refractarios del incinerador, especialmente con sodio

TABLA 4.8

DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS PRODUCTO DE LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS

Metal	Escoria %	Polvo colectado %	Gases de escape tratados %
Fierro	99	1	0.02
Cobre	89	10	1.00
Plomo	58	37	5.00

- Continuación -

Metal	Escoria %	Polvo colectado %	Gases de escape tratados %
Zinc	51	45	4.00
Cadmio	12	76	12.00
Mercurio	4	24	72.00

(Referencia a 100% de entrada y siempre suponiendo que exista un equipo de control de gases y partículas)

4.4.4 Problemática de la incineración

Para considerar la incineración como una solución para el tratamiento de residuos, se debe tomar en cuenta que:

- 1) El proceso de incineración requiere de cantidades constantes y homogéneas de residuos como combustible. Por lo tanto, esta tecnología dificultaría la introducción de políticas para evitar la generación de residuos peligrosos así como su reducción y reuso, acciones, todas éstas, que deberían desarrollarse a mediano y largo plazo.
- 2) La introducción y ampliación de instalaciones de incineración puede inducir al empresario a no cambiar sus procesos de producción. Si alguien se hace cargo de los residuos se pueden seguir produciendo, considerando nada más el producto resultante y no el impacto ambiental de los procesos de producción.
- 3) El tratamiento de residuos por incineración representa una fuerte centralización y unificación tecnológica.

De lo anterior se desprende que la incineración es una tecnología de transición en tanto se logra evitar la generación de residuos y fomentar el reuso de los mismos.

CAPÍTULO V

IMPORTANCIA DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNOS

A principios de los setenta, como una respuesta al incremento en los costos de los combustibles fósiles, la industria cementera se vio en la necesidad de buscar alternativas que disminuyeran los costos de los mismos. Por lo tanto, se comenzó a utilizar coque, colas de carbón, fragmentos o llantas enteras y combustibles derivados de residuos, obteniéndose resultados muy satisfactorios.

Aun cuando el incremento en el precio de los combustibles es una razón muy atractiva para utilizar residuos como combustible alternativo, no es la única consideración significativa. Debido a que el volumen estimado de generación de residuos peligrosos equivale aproximadamente a cinco millones de toneladas anuales¹, y que este material necesita un tratamiento y disposición final, se han realizado diferentes pruebas con la finalidad de reutilizar la mayor cantidad de residuos peligrosos aprovechándolos como una fuente alterna de combustible para hornos de cemento.

En años anteriores, el método más sencillo de disposición de residuos peligrosos era el confinamiento por ser el más económico; sin embargo, se aprendió mucho acerca de los daños que estos confinamientos causaban debido a que sólo consistían en transferir el problema de un lugar a otro. Por estas mismas razones las restricciones para la construcción de un confinamiento o de un incinerador son cada vez mayores. En consecuencia, los hornos de cemento constituyen una opción preferente muy atractiva.

¹ Cortinas de Nava, op cit, Situación de los residuos peligrosos en México, p. 118.

Existe una fuerte sinergia entre las necesidades de la sociedad, la industria del manejo de residuos peligrosos y la industria del cemento. Esta sinergia es evidente: la sociedad necesita métodos eficientes y seguros de manejo de residuos peligrosos. La industria responsable de los residuos peligrosos necesita opciones de tratamiento térmico económico y la industria del cemento requiere de bajos costos de operación.

Como un antecedente, en Estados Unidos diversas compañías productoras de cemento han realizado pruebas para el reuso de residuos peligrosos como un combustible alternativo. Asimismo, se han realizado pruebas tanto para el uso de residuos sólidos como líquidos siendo estos últimos los de mayor importancia en este trabajo.

Los residuos líquidos son más fácilmente manejables por medio de bombas, tanques, boquillas aspersoras, etcétera. Con los líquidos se dificulta menos formar una mezcla homogénea.

Las temperaturas elevadas y los prolongados tiempos de residencia, condiciones inherentes en la operación de los hornos para la producción de cemento, garantizan una completa destrucción del material orgánico.

Una cantidad considerable de pruebas realizadas en compañías productoras de cemento en Estados Unidos indican que los hornos de cemento pueden destruir cualquier compuesto orgánico alimentado como líquido atomizado en la descarga del "clinker" al final del horno con una eficiencia de al menos 99.99%. Este nivel de eficiencia es teóricamente razonable debido a las condiciones ya mencionadas (altas temperaturas y prolongados tiempos de residencia).

En general, podemos considerar a los hornos de cemento como una alternativa versátil para el manejo de una amplia variedad de residuos peligrosos debido a que, las materias primas utilizadas para

la producción del cemento a menudo contienen sulfatos y sales cloradas, metales pesados tales como plomo, cadmio, cromo y arsénico así como materiales orgánicos. Muchos de estos compuestos están contenidos también en los combustibles fósiles, o en los residuos peligrosos destinados a la elaboración de combustible alternativo, y todos estos materiales dentro del horno llegan a ser parte de los polvos residuales de la producción de cemento. A excepción de muy pocos, todos los materiales que se introducen a los hornos se oxidan y estabilizan sin requerir de un tratamiento posterior.

5.1 Características y especificaciones de un combustible alternativo líquido

Los materiales líquidos disponibles para la elaboración de combustible alternativo son esencialmente solventes y aceites residuales de industrias tales como la de pinturas, de plásticos, de tintas, petroquímicas, farmacéuticas y de recubrimientos entre muchas otras más. La composición de estos residuos consiste principalmente de mezclas de líquidos orgánicos tales como alcoholes, "thinner", acetona, aceites, etcétera, que contienen también pequeñas cantidades de materiales del proceso que generó el residuo. A continuación se muestra una lista de los tipos genéricos de sustancias orgánicas que pueden estar presentes, en proporciones diversas, en un combustible alternativo:

- Alcoholes
- Glicoles
- Polioles
- Cetonas
- Ésteres
- Aldehidos
- Hidrocarburos
- Éteres

- Óxidos y epóxidos
- Aceites de petróleo y derivados
- Aceites vegetales y derivados
- Desengrasantes
- Líquidos orgánicos clorados
- Polímeros, copolímeros, oligómeros y fragmentos de resinas incluyendo:
 - Epóxicos
 - Fenólicos
 - Poliésteres
 - Acrílicos
 - Uretanos
 - Vinílicos
 - Polietilenos
 - Polipropileno
 - Estirenos
 - etcétera.

Ésta es tan solo una lista descriptiva que no considera intervalos, ya que las proporciones pueden ser muy variadas. Las sustancias contenidas en el combustible líquido suplementario o alternativo son aquellas usadas en productos tales como pinturas, barnices, lacas, diluyentes, limpiadores, formulación de detergentes, removedores de manchas, gasolina, etcétera, todos éstos empleados diariamente en la industria, comercio o casas habitación. La concentración de compuestos orgánicos que pueden o no estar presentes en una mezcla en particular debe estar dada por las especificaciones del cliente y aquellas que dicte la autoridad en cuestión (SEMARNYP: INE). Un ejemplo de esto se desarrolla a continuación en las tablas 5.1 y 5.2.

TABLA 5.1
COMPOSICIÓN TÍPICA DE UN COMBUSTIBLE ALTERNO

COMPUESTO	FRACCIÓN EN PESO
Solventes clorados 1,1,1- tricloroetano tricloroetileno tetracloroetileno cloruro de metileno tetracloruro de carbono	0 - 5 %
Alcoholes metílico etílico n-propílico isopropílico n-butílico	0 - 20 %
Cetonas metiletilcetona metilisobutilcetona acetona ciclopentanona	0 - 15 %

-Continuación-

COMPUESTO	FRACCIÓN EN PESO
Aldehidos formaldehido butiraldehido acetaldehido	0 - 0.5 %
Aceites de petróleo aceites combustibles, lubricantes aceites hidráulicos aceites de cortes	0 - 50 %
Acetatos etilacetato metilacetato butilacetato vinilacetato	0 - 25 %
Fenol	0 - 5 %
Aromáticos benceno tolueno xileno naftaleno	0 - 25 %
Alifáticos hexano heptano pentano	0 - 25 %
Ácidos grasos	0 - 5 %

TABLA 5.2
ESPECIFICACIONES PROMEDIO DE
UN COMBUSTIBLE LÍQUIDO ALTERNO

PARÁMETRO A EVALUAR	VALOR
Azufre	< 1% peso
Sólidos suspendidos	15 - 25%
Ceniza	< 2%
Bifenilos policlorados	50 ppm máximo
Contenido de calor (poder calorífico)	> 5,000 kcal/kg
Cloro orgánico total	< 1%
Olor	Hidrocarburos ligeros
Viscosidad	25 cps @ 25°C 1 atm.
Agua total	<15% peso

5.2 Especificaciones a evaluar en un residuo peligroso para la elaboración de combustible alterno

El propósito de esta evaluación es obtener toda la información necesaria con respecto a las características fisicoquímicas de los componentes del residuo para así poder crear un perfil mediante el cual manejar la elaboración del combustible alterno. Dicho análisis debe incluir los siguientes parámetros:

1. El análisis de contenido de calor, cloro, gravedad específica, cenizas, azufre, metales, bifenilos policlorados y agua.

2. La composición de orgánicos volátiles, orgánicos volátiles clorados y otros compuestos clorados, así como de materiales que representen más de 10% del residuo.
3. Los constituyentes de residuos peligrosos que estén presentes en más de 100 ppm deben verificarse con análisis de laboratorio externo.
4. La certificación o rechazo de cualquier sustancia química o combinación de sustancias que contengan cantidades mayores a 50 ppm de bifenilos policlorados.
5. La certificación de que el material no está contaminado con herbicidas ni plaguicidas en un nivel mayor de 2 ppm.
6. Las características físicas que incluyan sólidos, humedad, gravedad específica, viscosidad, punto de flama, número de fases y sólidos suspendidos.
7. Los líquidos corrosivos y reactivos no se aceptan.

A continuación se muestra una lista de los principales parámetros y sus valores promedio de concentración que debe de reportar una hoja de perfil:

	INTERVALO ACEPTABLE*
• Arsénico	< 10 ppm
• Berilio	< 10 ppm
• Bario	< 4000 ppm
• Cadmio	< 350 ppm
• Cromo	< 2000 ppm
• Cobre	< 1500 ppm

- Plomo < 4000 ppm
- Níquel < 1000 ppm
- Mercurio < 3 ppm
- Selenio < 15 ppm
- Azufre < 1%
- Cenizas < 2%
- Sólidos suspendidos 25%
- Contenido de calor > 5000 kcal/kg
- Humedad 15%
- Densidad 0.85-1.1
- Punto de flama > 40°C
- Halógenos totales < 1%
- Bifenilos policlorados < 50 ppm
- Pesticidas y herbicidas < 2 ppm

* Valores promedio de concentración aceptables por la empresa de manejo de residuos peligrosos

Los métodos analíticos empleados para la determinación de los principales parámetros antes mencionados son²:

Bifenilos policlorados:

Los bifenilos policlorados presentes en el combustible deben analizarse de acuerdo con el método 8080 de la EPA, el cual se encuentra en la publicación SW-846 de Julio de 1992. El método emplea cromatografía de gases con la detección de los bifenilos policlorados capturados por los electrones. El método debe

² Coplay Cement Company, *idem*.

policlorados capturados por los electrones. El método debe modificarse para cambiar la matriz simple por medio de la adición de una dilución de hexano y ácido sulfúrico. El método se desarrolla usando un cromatógrafo de gases con detector de captura de electrones.

Cloro total

El contenido de cloro total del combustible alternativo será determinado de acuerdo con el método ASTM D808, método estándar para cloro en productos de petróleo nuevos o usados (método de bomba de oxígeno). El método se modificará a fin de obtener los resultados correctos en el menor tiempo posible por medio de la sustitución de una titulación volumétrica de nitrato mercurico de acuerdo con el análisis equivalente para el procedimiento analítico gravimétrico de cloro (método SW846 9252).

Poder calorífico

El poder calorífico más alto del combustible alternativo se determina en general con el método ASTM D240, prueba para calor de combustión para combustibles de hidrocarburos líquidos por bomba calorimétrica.

Densidad

La densidad del combustible líquido alternativo se determinará pesando una muestra volumétrica de 1 ml del residuo en una balanza analítica.

Metales (Prueba de composición)

Los siguientes metales deben analizarse por medio de espectrometría de absorción atómica o por espectrometría por inyección de plasma, precedidos por una calcinación en una mufla y / o una digestión de ácidos empleando el método SW846.

Antimonio	Cromo
Arsénico	Plomo
Bario	Mercurio
Berilio	Níquel
Cadmio	Selenio
Cobre	Plata
Talio	

Azufre

El azufre en los combustibles alternos se determina utilizando el método ASTM D129, prueba para azufre en productos de petróleo. Este método se modificará con la finalidad de obtener un resultado correcto en el menor tiempo posible por la sustitución de una titulación volumétrica o análisis de turbidez para un proceso gravimétrico.

Cenizas

El contenido de cenizas se determina gravimétricamente de acuerdo con el método ASTM D482, cenizas para productos de petróleo. Una muestra representativa del residuo se calcina en una mufla a 400°C. El residuo resultante se pesa y se calcula el contenido de cenizas.

Sólidos suspendidos

El contenido de sólidos suspendidos se determina por la filtración de una alícuota representativa del residuo a través de un tamiz con una malla de 30. Los sólidos retenidos en la malla son pesados y cuantificados.

Punto de "flasheo"

El punto de "flasheo" de un residuo se determina de acuerdo con el método 1010 SWB46, punto de flasheo de copa cerrada Pensky-Martens.

5.3 Medición de emisiones a la atmósfera

Las compañías cementeras interesadas en quemar residuos peligrosos como combustible alternativo suelen reemplazar de 25 a 40% de los combustibles fósiles normales por diversos tipos de combustibles alternos. Para ello es necesario apegarse a especificaciones reguladas.

Actualmente, en México no existe ninguna norma que regule la medición de emisiones a la atmósfera para el quemado de residuos peligrosos en calderas, hornos industriales e incineradores. Dadas estas limitaciones, y con la finalidad de tener un punto de referencia para la evaluación de dichas emisiones, se consideran especificaciones internacionales. La Agencia de Protección del Ambiente de los E.E.U.U. (EPA)²⁰ considera que un residuo puede quemarse o al menos destruirse parcialmente si contiene un total de 500 ppm o más en peso de constituyentes peligrosos no metálicos. Asimismo, la EPA reconoce que para quemar total o parcialmente un residuo y recuperar su energía debe contar con un poder calorífico de al menos 3,000 kcal/kg.

Los residuos peligrosos, aun cuando forman parte de la materia prima para la elaboración del producto, necesitan de requerimientos

²⁰ Federal Register, Part III, "Burning of hazardous wastes in boilers and industrial furnaces; final rule". Environmental Protection Agency, February 21, 1991, pp. 7134-7240.

combustión, no provoquen efectos adversos en la salud humana y en el ambiente. Para lograr estos objetivos la EPA ha fijado estándares aplicables al quemado de residuos peligrosos en calderas y hornos industriales dentro de los cuales se incluyen los hornos de cemento. Estas reglas controlan las emisiones de compuestos orgánicos tóxicos, metales tóxicos, ácido clorhídrico y partículas.

5.3.1 Control de emisiones de compuestos orgánicos

Quemar residuos peligrosos con alto contenido de residuos orgánicos tóxicos bajo condiciones poco eficientes de combustión puede dar como resultado emisiones sustanciales de compuestos tóxicos originalmente presentes en los residuos así como otros producidos por una mala combustión. La cantidad de los compuestos tóxicos emitidos depende tanto de la concentración de éstos en el residuo como de los intervalos y condiciones de combustión bajo las cuales el residuo se quema.

La EPA controla las emisiones de compuestos orgánicos tóxicos para calderas y hornos industriales que queman residuos peligrosos con dos estándares desarrollados: el primero, con una eficiencia estándar de destrucción y remoción (DRE) del 99.99% para los principales compuestos orgánicos peligrosos (POHC) y del 99.9999% de DRE para las dioxinas (compuestos altamente tóxicos considerados carcinogénicos y teratogénicos) y, el segundo, que controla las emisiones regulando los productos de combustión incompleta (PIC) limitando los gases de combustión, la concentración de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) para tener una operación con condiciones óptimas de combustión y para evitar la emisión de PIC a niveles que puedan causar efectos adversos en la salud pública y en el ambiente. Asimismo, se realizan pruebas de emisión en las cuales se miden riesgos en la salud para dioxinas cloradas y furanos clorados cuando pueda existir una concentración significativa potencial.

5.3.2 Control de emisiones de metales tóxicos

La EPA ha identificado 12 metales como dañinos al ser humano y al ambiente: antimonio, arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, plomo, mercurio, níquel, selenio, plata y talio. Cinco de estos metales (o sus compuestos) se consideran carcinogénicos: arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente y níquel. Sin embargo, las reglas establecen la emisión límite para 10 metales tóxicos como se muestra en la tabla 5.3.

Muchos de estos metales se encuentran en los residuos peligrosos que se queman en calderas y hornos industriales en niveles mayores a los del combustible tradicional. Por ello, los estándares que se implementan buscan los límites de parámetros específicos de operación incluyendo intervalo de alimentación tanto de residuos peligrosos como de metales para todas las corrientes así como temperatura de la cámara de combustión y parámetros específicos del sistema de control de contaminación ambiental.

TABLA 5.3
CONCENTRACIÓN LÍMITE DE METALES TÓXICOS

METALES TÓXICOS	CONCENTRACIÓN LÍMITE (mg/kg)
Antimonio	1*E+00
Arsénico	5*E+00
Bario	1*E+02
Berilio	7*E-03
Cadmio	1*E+00
Cromo	5*E+00*

5.3.2 Control de emisiones de metales tóxicos

La EPA ha identificado 12 metales como dañinos al ser humano y al ambiente: antimonio, arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, plomo, mercurio, níquel, selenio, plata y talio. Cinco de estos metales (o sus compuestos) se consideran carcinogénicos: arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente y níquel. Sin embargo, las reglas establecen la emisión límite para 10 metales tóxicos como se muestra en la tabla 5.3.

Muchos de estos metales se encuentran en los residuos peligrosos que se queman en calderas y hornos industriales en niveles mayores a los del combustible tradicional. Por ello, los estándares que se implementan buscan los límites de parámetros específicos de operación incluyendo intervalo de alimentación tanto de residuos peligrosos como de metales para todas las corrientes así como temperatura de la cámara de combustión y parámetros específicos del sistema de control de contaminación ambiental.

TABLA 5.3
CONCENTRACIÓN LÍMITE DE METALES TÓXICOS

METALES TÓXICOS	CONCENTRACIÓN LÍMITE (mg/kg)
Antimonio	1*E+00
Arsénico	5*E+00
Bario	1*E+02
Berilio	7*E-03
Cadmio	1*E+00
Cromo	5*E+00*

Plomo	5*E+00
Mercurio	2*E-01
Níquel	7*E+01
Selenio	1*E+00

5.3.3 Estándares de emisiones para partículas

Las calderas y hornos industriales que queman residuos peligrosos pueden emitir cantidades sustanciales de partículas que pueden causar efectos adversos en la salud humana y en el ambiente aun si no se adsorben tóxicos en dichas partículas.

Actualmente, la EPA establece un estándar para calderas y hornos industriales cuyo límite de emisión de partículas es de 0.08 gr/dscf (granos/pie cúbico estándar seco) corregido para 7% de oxígeno. Este es el mismo estándar aplicable a incineradores de residuos peligrosos con la finalidad de dar una medida común a la emisión de partículas en calderas, hornos industriales e incineradores. Existen hornos industriales que registran emisiones menores que 0.08 gr/dscf; esto se debe a que tienen equipos de colección de partículas adecuados que les permite utilizarlas nuevamente como materia prima. El mejor ejemplo de estos procesos son los hornos de cemento.

Los estándares de partículas se implementan limitando el intervalo de alimentación en todas las corrientes y mediante las restricciones en los parámetros de operación específicos de los sistemas de control de contaminación ambiental.

Las reglas hacen una consideración especial a los hornos de cemento puesto que sus corrientes de alimentación de materias primas contienen la mayoría de las cenizas; por lo tanto no es necesario el monitoreo del intervalo de alimentación de cenizas a

todas las corrientes alimentadas. No obstante, se hace énfasis en que los hornos de cemento, como todas las calderas y hornos industriales, tienen que demostrar el cumplimiento de los estándares de emisión de partículas durante el quemado.

5.3.4 Control de emisiones para ácido clorhídrico y cloro libre

En pruebas recientes de la EPA se encontró que aproximadamente 50% de las emisiones gaseosas de cloro están conformadas por ácido clorhídrico HCl y otro 50% por cloro libre Cl₂ por lo que los controladores para HCl pueden no ser adecuados para el control de emisiones de Cl₂, ya que éste tiene una solubilidad en agua mucho menor que el HCl; sin embargo, las emisiones de Cl₂ pueden controlarse incrementando el contenido de hidrógeno alimentado o bien disminuyendo cloro alimentado.

En los hornos de cemento la gran cantidad de partículas alcalinas provenientes de la piedra caliza neutralizan en gran medida el cloro generado de la alimentación de residuos peligrosos.

Actualmente, el control de emisiones se regula con los mismos controles de emisiones fugitivas aplicables comúnmente a incineradores de residuos peligrosos: 0.4 mg/ m³ de Cl₂.

5.3.5 Control de emisiones a la atmósfera en México

Con la finalidad de cumplir con la Legislación Mexicana, las emisiones resultantes de la combustión de residuos peligrosos, tanto en incineradores como en calderas y hornos industriales, deben apegarse a la Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-94 para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, misma que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas

suspendidas totales, bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

A pesar de que esta norma no regula específicamente las emisiones resultantes de la combustión de residuos peligrosos, éstas se pueden incluir ya que tanto los incineradores, hornos industriales y calderas se consideran fuentes fijas. Dicha norma incluye como requisito para la operación de los equipos de combustión que los combustibles que se distribuyen en México deberán apegarse a la calidad ecológica necesaria para cumplir con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en esta norma. De esta manera, se incluyen las empresas generadoras de combustible alterno, las cuales deben garantizar que las emisiones provenientes de su combustible entren en el intervalo de emisión que muestra la tabla 5.4

TABLA 5.4
INTERVALO DE MEDICIÓN DE EMISIONES PARA COMBUSTIBLES ALTERNOS

MONITOREO CONTINUO	
EMISIÓN	INTERVALO ACEPTABLE
CO % vol.	0 - 30
CO ₂ % vol	0 - 30
O ₂ % vol	0 - 25
H ₂ O % vol	0 - 30
NO _x ppm	0 - 1000
SO ₂ ppm	0 - 100
HCl ppm	0 - 100

-Continuación-

NH ₃ ppm	0 - 500
HCT ppm	0 - 100

MONITOREO PUNTUAL

EMISIÓN	INTERVALO ACEPTABLE
Partículas kg/h	0.6319(C)0.7502
Dioxinas	Ausencia
Furanos	Ausencia
Metales pesados %	1 máximo

C= cantidad de material alimentado a hornos de calcinación en ton/h

Las empresas que suministren combustibles sólidos y líquidos deberán certificar en las facturas de embarque el contenido de azufre expresado en porcentaje de peso. La descarga de dióxido de azufre a la atmósfera de equipos que usen combustibles gaseosos sólidos y líquidos o cualquiera de sus combinaciones se calculará con base en el consumo mensual de éstos y el contenido de azufre certificado por el proveedor.

No se cuenta con datos o cifras estadísticas de la operación de los programas de combustible alternativo en cuestión de registro de las emisiones a la atmósfera. Debido a que en su totalidad los hornos que se encuentran sustituyendo combustóleo por combustible alternativo están en protocolo de prueba y los reportes generados en la operación continúan en la etapa de revisión y evaluación por parte del INE (Instituto Nacional de Ecología), el público no tiene acceso alguno a dicha información dado que los reportes son manejados en forma estrictamente confidencial.

CAPÍTULO VI

ESQUEMA DE UN PROGRAMA DE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS COMO COMBUSTIBLE ALTERNO EN MÉXICO.

Uno de los grandes desafíos que enfrenta el país es la modificación de las tendencias y percepciones sobre el manejo y disposición final de los residuos peligrosos. Esto implica romper la inercia que durante años han propiciado el almacenamiento de dichos residuos en los patios de las empresas, su vertimiento en los drenajes o tiraderos municipales de basura y tantas otras modalidades de eliminación, ambientalmente inadecuadas.

Se trata, pues, de abandonar dichas conductas y reemplazarlas por otras en las que su manejo sea respetuoso del ambiente a partir de un enfoque en el cual se establezca un "esquema de un programa de manejo de residuos peligrosos".

En situaciones en las que pueden existir problemas de seguridad, como es el caso de los residuos peligrosos, es importante establecer un esquema que adjudique responsabilidades a determinadas personas.

El éxito de los programas depende en gran medida de la participación social en las actividades relacionadas con el manejo y disposición de los residuos peligrosos, lo cual está condicionado a la realización minuciosa de un esquema que permita contar con un seguimiento adecuado del proceso y que garantice el cumplimiento de las especificaciones requeridas en el combustible alterno elaborado.

Un paso fundamental para lograr el cambio de actitudes y comportamientos de los consumidores de combustibles alternos consiste en que éstos reconozcan que su utilización puede resultar un buen negocio e incluso aumentar su competitividad en los

negocios. Esto significa poner a su alcance información que les permita establecer juicios sobre la conveniencia de este enfoque. En particular, conviene difundir aquella que muestre las ventajas que proporciona el uso eficiente de la energía y el reuso de los materiales peligrosos así como el disminuir posibles daños a la salud y al ambiente.

Para llevar a cabo la ejecución del programa intervienen tres partes: la empresa generadora del residuo, la empresa de manejo y elaboración de combustible alterno y la empresa consumidora de combustible alterno (cementera). La vinculación entre estas tres partes debe ser estrecha y coordinada de tal forma que al cumplir cada una con sus actividades acordadas se logre un proceso óptimo y eficaz. En la tabla 6.1 se muestra cada una de dichas partes con sus actividades correspondientes.

TABLA 6.1
PARTES IMPLICADAS EN EL PROGRAMA DE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS Y SUS ACTIVIDADES

EMPRESA GENERADORA DEL RESIDUO	EMPRESA DE MANEJO Y ELABORACIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNO	EMPRESA DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE ALTERNO (CEMENTERA)
<ul style="list-style-type: none"> • Percepción y participación empresarial. • Caracterización (perfil) <ul style="list-style-type: none"> * Análisis de muestras 	<ul style="list-style-type: none"> • Recolección <ul style="list-style-type: none"> * Análisis de verificación. • Almacenamiento • Mezclado <ul style="list-style-type: none"> * Análisis de especificación. • Almacenamiento de material mezclado. • Acondicionamiento <ul style="list-style-type: none"> * Análisis de calidad • Transportación <ul style="list-style-type: none"> * Manifiestos Entrega, transporte y recepción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestreo de la unidad de transporte <ul style="list-style-type: none"> * Análisis de recepción Pc, H₂O y Cl • Descarga a zona de almacenamiento • Muestreo de zona de almacenamiento <ul style="list-style-type: none"> * Análisis completo de certificación (9 parámetros) • Descarga a zona de inyección • Muestreo de zona de inyección <ul style="list-style-type: none"> * Análisis de comprobación final. • Inyección del combustible alterno • Operación del horno <ul style="list-style-type: none"> * Análisis de calidad del producto Análisis de emisiones

6.1 Descripción del esquema del programa de manejo de residuos peligrosos

6.1.1 Empresa generadora del residuo

- *Percepción y participación.*- Es necesario persuadir al empresario de modificar su esquema de manejo de residuos y considerar nuevas alternativas tecnológicas para su disposición.
- *Caracterización.*- En esta etapa, y de acuerdo con el proceso mediante el cual se obtiene el residuo, la empresa generadora debe realizar análisis fisicoquímicos para identificar los componentes del mismo, y con base en estos resultados identificar el método de disposición más adecuado (reciclaje, reuso, confinamiento, tratamiento). De este análisis fisicoquímico se desprende un perfil del lote con el cual se presenta el residuo a la empresa de manejo.

6.1.2 Empresa de manejo y elaboración de combustible alterno

- *Recolección.*- Una vez aceptado el lote se realiza un análisis de verificación, el cual es comparado con el perfil presentado por la empresa generadora. Dicho análisis debe incluir los nueve principales parámetros a especificar en un combustible alterno: poder calorífico, porcentaje de agua, porcentaje de cloro, porcentaje de metales pesados, porcentaje de azufre, porcentaje de bifenilos policlorados, viscosidad, pH, y porcentaje de sólidos. Con estos resultados se elabora una clasificación para el inventario de materias primas.
- *Almacenamiento.*- Cuando la muestra ya está caracterizada, se codifica de acuerdo con el contenido de agua, cloro y el poder calorífico del residuo. Una vez codificado el lote se almacena según la característica predominante de éste, hasta que sea utilizado para mezclarse.

- *Mezclado.- De acuerdo con las especificaciones requeridas por el industrial se eligen las proporciones necesarias de los lotes almacenados para mezclarse. Una vez preparada la mezcla se le realiza un análisis físicoquímico completo que contenga los nueve parámetros antes mencionados.*
- *Almacenamiento de material mezclado.- Una vez aprobados los análisis de cumplimiento de especificaciones el material mezclado se almacena antes de su distribución.*
- *Acondicionamiento y mezclado final.- Antes de distribuirlo, el combustible alterno se somete a un último análisis físicoquímico de control de calidad. Si el lote no cumple con los requisitos solicitados se acondiciona proporcionándole los componentes necesarios para entrar en especificación. Una vez acondicionado se analiza hasta lograr la calidad deseada.*
- *Transportación.- Cuando se ha cumplido con las especificaciones requeridas por el cliente, el combustible alterno está listo para su transportación; ésta se puede llevar a cabo por medio de un transporte propio de la empresa de manejo o el alquiler de un transportista. Para poder efectuar la transportación se requieren dos permisos, uno expedido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (requerimiento que debe cubrir el transportista) y otro expedido por la Secretaria del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (permiso que debe obtener la empresa de manejo). Cuando la empresa de manejo lleva a cabo el transporte, ésta debe contar con ambos permisos así como cumplir con el sistema de notificación y autorización correspondiente.*

Existe un reglamento para el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos publicado por la Secretaria de

Comunicaciones y Transportes¹ en concordancia con la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, así como con las Leyes de Vías Generales de Comunicación y de Salud. Dicho reglamento está dividido en nueve títulos y comprende 136 artículos a los cuales deben apegarse tanto la empresa de manejo como el transportista. De este reglamento surge un proyecto conformado por nueve normas² que regulan aspectos técnicos del transporte de los residuos peligrosos.

Es necesario comentar que existen más de 70 empresas autorizadas por la SCT para el transporte de residuos peligrosos, las cuales, al carecer de la autorización correspondiente del INE, incurrir en ocasiones en prácticas irregulares, como es el desecho de residuos en barrancas o terrenos baldíos, ya que no disponen del incentivo o de los sistemas de control necesarios para garantizar que la carga sea llevada a su destino legal.

6.1.3 Empresa de consumo de combustible alterno (cementera)

- Muestreo.- Antes de descargar la unidad de transporte, se toma una muestra del combustible en el cual se verifica el poder calorífico y el contenido de agua y cloro con la finalidad de decidir la aceptación de dicho combustible.
- Descarga a zona de almacenamiento.- Una vez aceptado el combustible, se descarga a los tanques de almacenamiento donde permanece hasta la realización de un análisis completo.

1 SCT Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Reglamento para el transporte de materiales y residuos peligrosos, 7 de abril de 1993, DOF Diario Oficial de la Federación.

2 SCT, Proyecto de NOM's para el transporte de residuos peligrosos, 5 de noviembre de 1993, DOF

- *Muestreo a zona de almacenamiento.- El combustible almacenado se muestrea con la finalidad de someterlo a un análisis fisicoquímico completo de certificación que apruebe su traslado a tanques de inyección.*
- *Descarga a zona de inyección.- En cuanto se aprueba el análisis de certificación, el combustible se traslada a los tanques de inyección donde se mezcla con lotes recibidos con anterioridad, permaneciendo en dichos tanques hasta la aprobación para su inyección.*
- *Muestreo de zona de inyección.- Debido a la mezcla de diversos lotes en los tanques de inyección, se hace necesario realizar un análisis de comprobación final previo a la inyección al horno.*
- *Inyección del combustible alterno.- Una vez cumplidas todas las etapas antes mencionadas, el combustible alterno se inyecta al horno donde deberá reunir los requerimientos de combustión esperados.*
- *Operación del horno.- Una vez obtenido el "clinker" como producto de la combustión de las materias primas y de los residuos, se somete a pruebas de control de calidad para verificar que las especificaciones del producto no se hayan modificado con la inyección del combustible alterno. Para verificar el cumplimiento de las normas con respecto a emisiones se llevan a cabo, periódicamente, muestreos a las chimeneas del horno, los cuales se analizan y comparan con los valores permisibles.*

En el diagrama de flujo G.1 se muestran las actividades correspondientes a cada empresa y su interrelación.

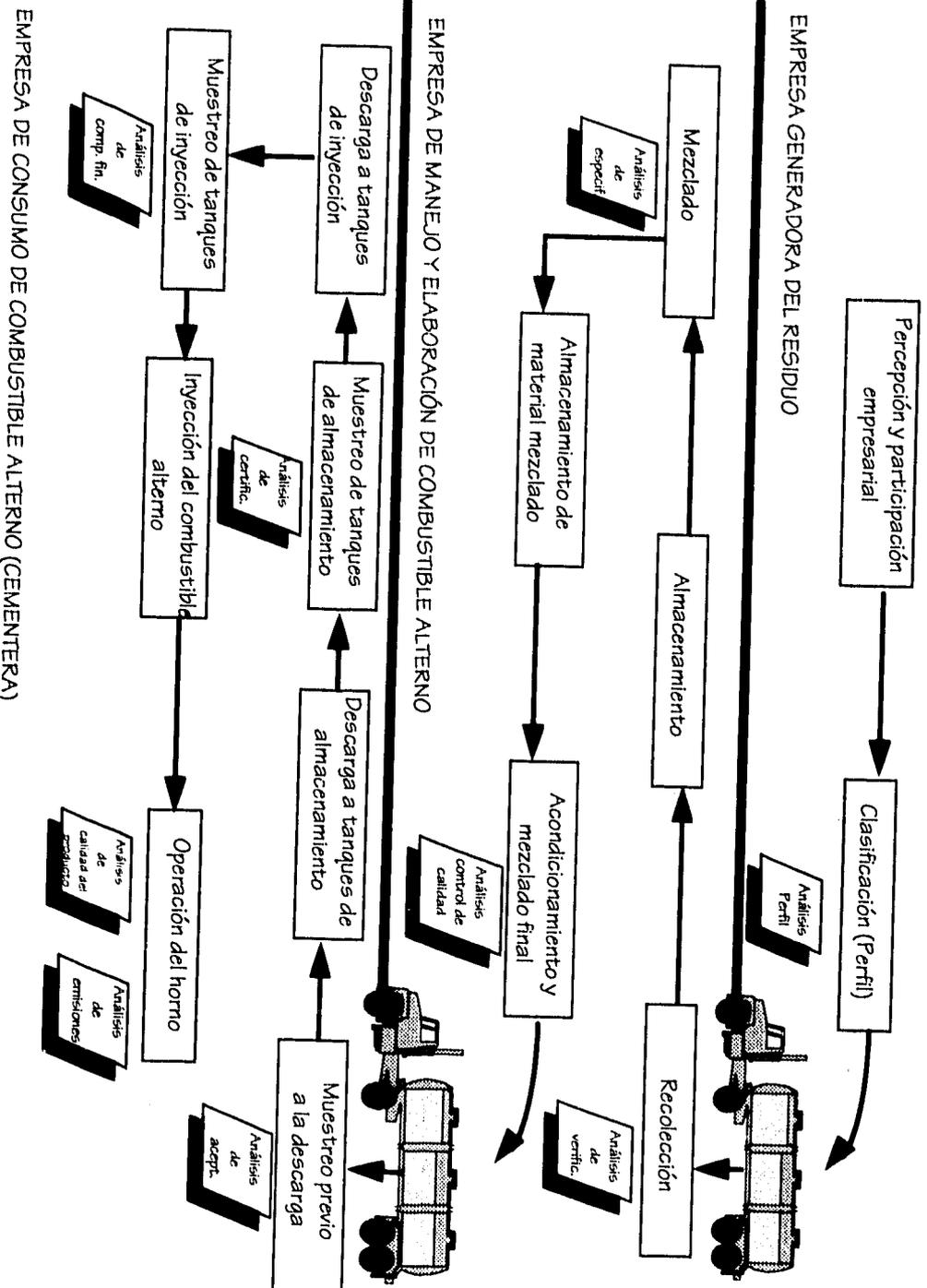
6.2 Diagrama de flujo típico para el manejo de combustible alterno

En general, un diagrama de flujo de combustible alterno está constituido por cinco zonas:

- 1) Zona de descarga del combustible alterno
- 2) Zona de almacenamiento
- 3) Zona de verificación previa a la inyección
- 4) Sistema de inyección de aire para la atomización
- 5) Zona de inyección al horno

El diagrama 6.2 muestra estas zonas especificando la instrumentación mínima necesaria para el proceso. Este diagrama debe adaptarse y modificarse para poder cumplir con los requerimientos de cada uno de los hornos que se desee implementar en este sistema.

6.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS
COMO COMBUSTIBLE ALTERNO



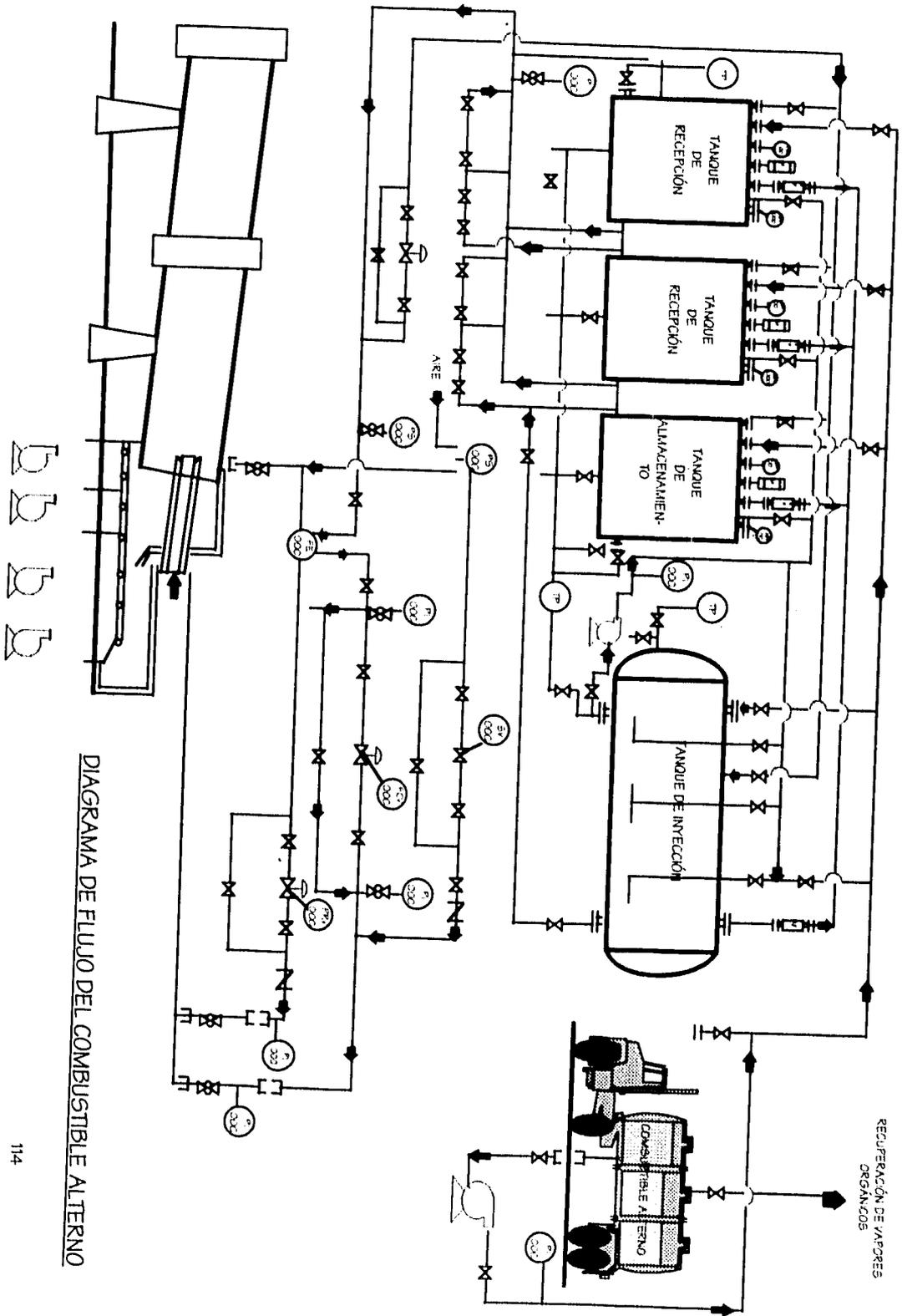


DIAGRAMA DE FLUJO DEL COMBUSTIBLE ALTERNO

6.3 Sistemas de notificación y autorización

La gestión de residuos peligrosos demanda conocer las empresas o actividades que los generan; el volumen y tipos de residuos que se producen, transportan, almacenan, reciclan, tratan o eliminan anualmente; los lugares del territorio nacional donde éstos ocurren; la información sobre las empresas transportadoras y las involucradas en su almacenamiento, tratamiento o eliminación final, así como datos sobre los incidentes en los que se producen derrames y la forma en que son atendidos para minimizar o controlar los riesgos. Con tal fin, se ha establecido un sistema de notificación basado en siete manifiestos y reportes de manejo de residuos peligrosos que la empresa generadora, la transportista y la destinataria deben expedir, como se muestra en la tabla 6.2.

La fundamentación legal de los manifiestos y sus aspectos básicos se presentan a continuación, así como quienes deben emplearlos para notificar sus actividades a las autoridades:

Manifiesto para empresas generadoras de residuos peligrosos

Su objetivo es identificar las fuentes generadoras de residuos peligrosos así como conocer los volúmenes generados anualmente y los tipos de residuos. Este manifiesto se entrega una sola vez al iniciarse la generación de residuos peligrosos, a menos que se produzcan cambios que ameriten ser dados a conocer.

Manifiesto de entrega, transporte y recepción de residuos peligrosos

Tiene como objetivo registrar y dar seguimiento a los movimientos de residuos peligrosos desde su generación hasta su disposición final, así como contar con información acerca de quiénes intervienen y son responsables de estos movimientos. Este manifiesto se entregará por cada embarque realizado de residuos peligrosos transportados y se

conservará por cinco años en el caso del transportista, y por diez años por cuanto al generador y al destinatario.

Manifiesto para casos de derrame de residuos peligrosos por accidente

Este manifiesto busca establecer un registro para hacer el seguimiento de los casos de residuos y sustancias peligrosas derramadas por accidente, así como de las empresas involucradas y las medidas correctivas empleadas para restablecer el equilibrio ecológico en las áreas afectadas. Este tipo de manifiesto lo entrega la empresa generadora del residuo peligroso y, en su caso, la empresa que preste el servicio de manejo en el momento del derrame de dichos residuos.

Manifiesto para generadores eventuales de residuos de bifenilos policlorados provenientes de equipos eléctricos

Pretende integrar una relación de empresas propietarias de equipos que contengan o estén contaminados con bifenilos policlorados para hacer el seguimiento de las medidas establecidas para su manejo y destrucción adecuados. Este manifiesto lo emite la empresa dueña de equipos que contengan o estén contaminados con bifenilos policlorados y debe entregarse al detectar en el equipo la presencia de los mismos.

Reporte mensual de residuos peligrosos confinados en sitios de disposición final

Tiene como objetivo establecer una base de datos acerca de la cantidad y naturaleza de los residuos peligrosos depositados en sitios de confinamiento controlado, así como los sistemas utilizados para su disposición final con el propósito de supervisar su operación.

Reporte semestral de residuos peligrosos enviados para su reciclaje, tratamiento, incineración o confinamiento

Con el se busca disponer de información acerca de la cantidad y naturaleza de los residuos peligrosos enviados por las empresas generadoras para su confinamiento o reciclaje, así como de los sistemas empleados en uno u otro caso.

Reporte semestral de residuos peligrosos recibidos para reciclaje o tratamiento

Pretende disponer de información acerca de la cantidad y la naturaleza de los residuos peligrosos confinados o reciclados, así como de los procedimientos utilizados para ello en las empresas operadoras de tales servicios.

TABLA 6.2

TIPOS DE EMPRESAS QUE REQUIEREN ENTREGAR LOS MANIFIESTOS
Y REPORTES DE RESIDUOS PELIGROSOS

<i>Tipos de manifiestos y reportes de manejo de residuos peligrosos</i>	<i>Empresas</i>
<i>Manifiesto para empresas generadoras de residuos peligrosos*</i>	<i>Generador</i>
<i>Manifiesto de entrega, transporte y recepción de residuos peligrosos*</i>	<i>Generador, transportista y destinatario</i>
<i>Manifiesto para casos de derrame de residuos peligrosos por accidente*</i>	<i>Generador y, en su caso, la empresa que preste el servicio</i>

- Continuación -

Tipos de manifiestos y reportes de manejo de residuos peligrosos	Empresas
Manifiesto para empresas generadoras eventuales de residuos de bifenilos policlorados provenientes de equipos eléctricos**	Generador
Reporte mensual de residuos peligrosos confinados en sitios de disposición final*	Generador y, en su caso, la empresa de disposición final
Reporte semestral de residuos peligrosos enviados para su reciclaje, tratamiento, incineración o confinamiento*	Generador
Reporte semestral de residuos peligrosos recibidos para reciclaje o tratamiento*	Empresa de reciclaje, tratamiento o disposición final

Fuentes: Dirección General de Normatividad Ambiental Instituto Nacional de Ecología, SEDESOL, 1993

Reglamento de la LGEEPA en materia de residuos peligrosos, DOF, Noviembre 25 de 1988

*DOF (3-V-89) Gaceta Ecológica No. 2 (VIII-89)

** Gaceta Ecológica No.11 (XI-90)

CAPÍTULO VII

SITUACIÓN REAL DEL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS EN LA INDUSTRIA MEXICANA DEL CEMENTO

7.1 Producción y capacidad instalada del cemento

En México la producción anual del cemento asciende en la actualidad a 30 millones de toneladas, elaboradas en 34 plantas localizadas a lo largo de la República Mexicana, las cuales cumplen su función de proveer a todo el país de este insumo necesario para el desarrollo de la sociedad. El mapa 7.1 y la tabla 7.1 muestran la ubicación de las plantas cementeras existentes por entidad federativa así como su razón social. El crecimiento de la producción de cemento ha sido ascendente. En 1986 se produjeron 19.751 millones de toneladas, las cuales, comparadas con un volumen de 30 millones de toneladas producidas en 1994 representan un incremento de 34.2%, como se muestra en la gráfica 7.1

La capacidad instalada de la industria del cemento aumentó de 32.922 millones de toneladas en 1986 a 36.5 millones de toneladas en 1994, es decir, tuvo un incremento de apenas 3.578 millones de toneladas equivalentes a un 9.8% como se muestra en la gráfica 7.2. La razón de este crecimiento tan bajo obedece, fundamentalmente, a que la industria ha tenido una capacidad excedente importante desde 1982, cuando se inició la crisis por la que sigue atravesando la economía del país.

Los datos del aprovechamiento de la capacidad instalada señalan un incremento que va de 60% en 1986 a 82% en 1994 lo que equivaldría a un incremento de 2.75% promedio anual. Esto refleja que a pesar de la crisis, la tendencia es creciente, como se puede observar en la gráfica 7.3.

TABLA 7.1
UBICACIÓN DE LAS PLANTAS CEMENTERAS
EN LA REPÚBLICA MEXICANA

Ubicación Mapa 7.1	Entidad Federativa	Razón Social
1	Hidalgo	-Cemento Portland Blanco de México S.A -Cementos Mexicanos S.A (Huichapan) -Cementos Tolteca S.A de C.V (div. Atotonilco) -Cementos Tolteca S.A. de C.V (div. Tolteca) -Cementos Cruz Azul S.C.L. Planta Jasso
2	Sonora	-Cemento Portland Nacional S.A. de C.V.
3	Edo. de México	-Cementos Anáhuac S.A. de C.V. -Cementos Apasco S.A. de C.V. (div. centro)
4	San Luis Potosí	-Cementos Anáhuac del Golfo S.A. de C. V -Cementos Mexicanos S.A.
5	Tabasco	-Cementos Apasco S.A. de C.V. (div. Tabasco)
6	Puebla	-Cementos Atoyac S.A. de C.V.
7	Guerrero	-Cementos de Acapulco S.A.

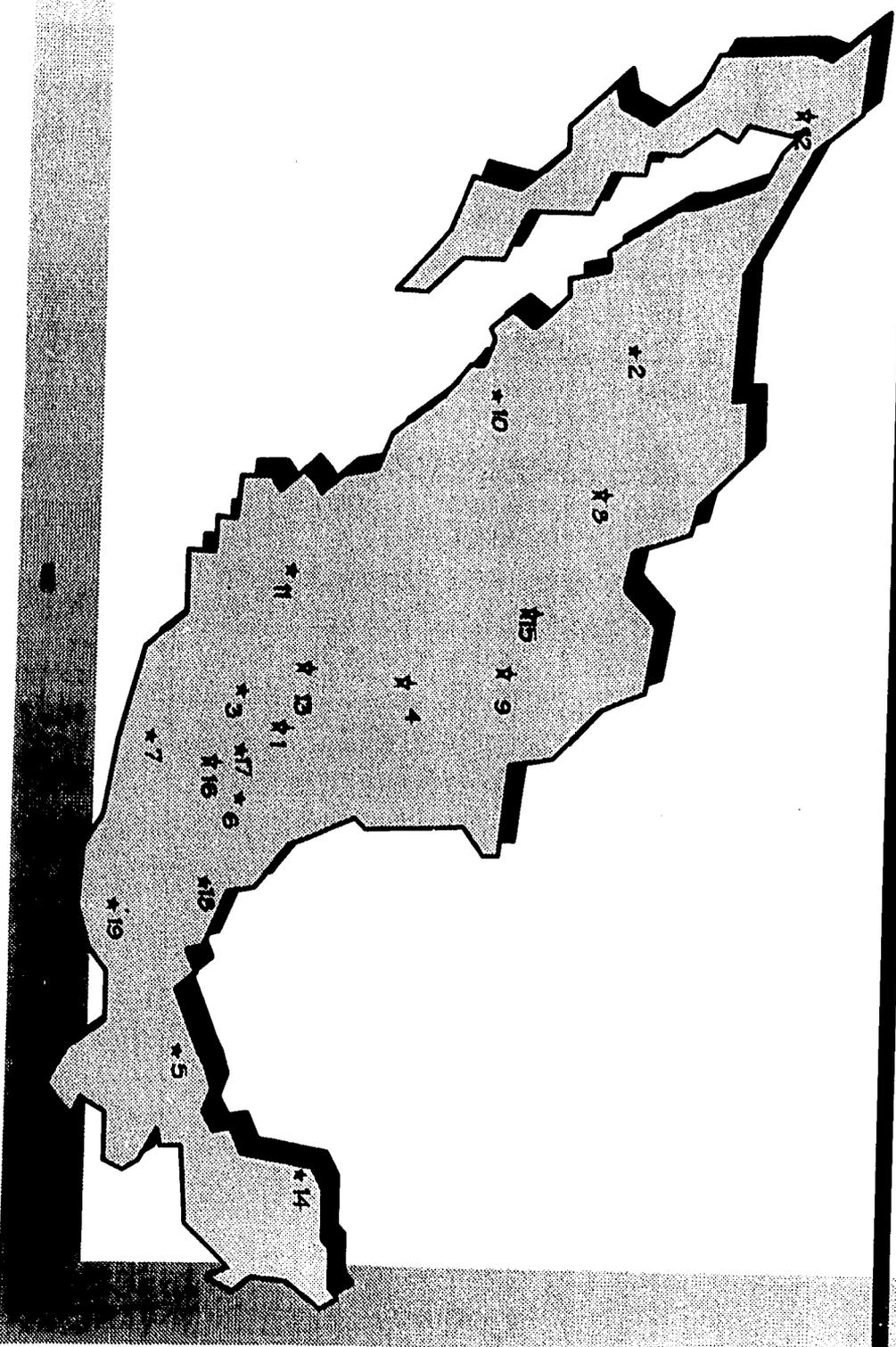
-Continuación-

8	Chihuahua	-Cementos de Chihuahua S.A de C.V -Cementos de Chihuahua S.A. de C.V(Cd. Juárez)
9	Nuevo León	-Cementos del Norte S.A -Cementos Hidalgo S.C.L -Cementos Mexicanos S.A. (Monterrey)
10	Sinaloa	-Cementos del Pacífico S.A de C.V. -Cementos Sinaloa S.A. de C.V.
11	Jalisco	-Cementos Guadalajara S.A (Guadalajara) -Cementos Tolteca S.A. de C.V (div. Zapotiltic)
12	B.C. Norte	-Cementos Guadalajara S. A. (Ensenada)
13	Guanajuato	-Cementos Maya S.A.
14	Yucatán	-Cementos Maya S.A. (Mérida)
15	Coahuila	-Cementos Mexicanos S.A. (Torreón)
16	Morelos	-Cementos Portland Moctezuma S.A. de C.V.
17	D.F	-Cementos Tolteca S.A de C.V. (div. Mixcoac) fuera de operación
18	Veracruz	-Cementos Veracruz S.A de C.V.
19	Oaxaca	-Cementos Cruz Azul S.C.L. Planta Lagunas

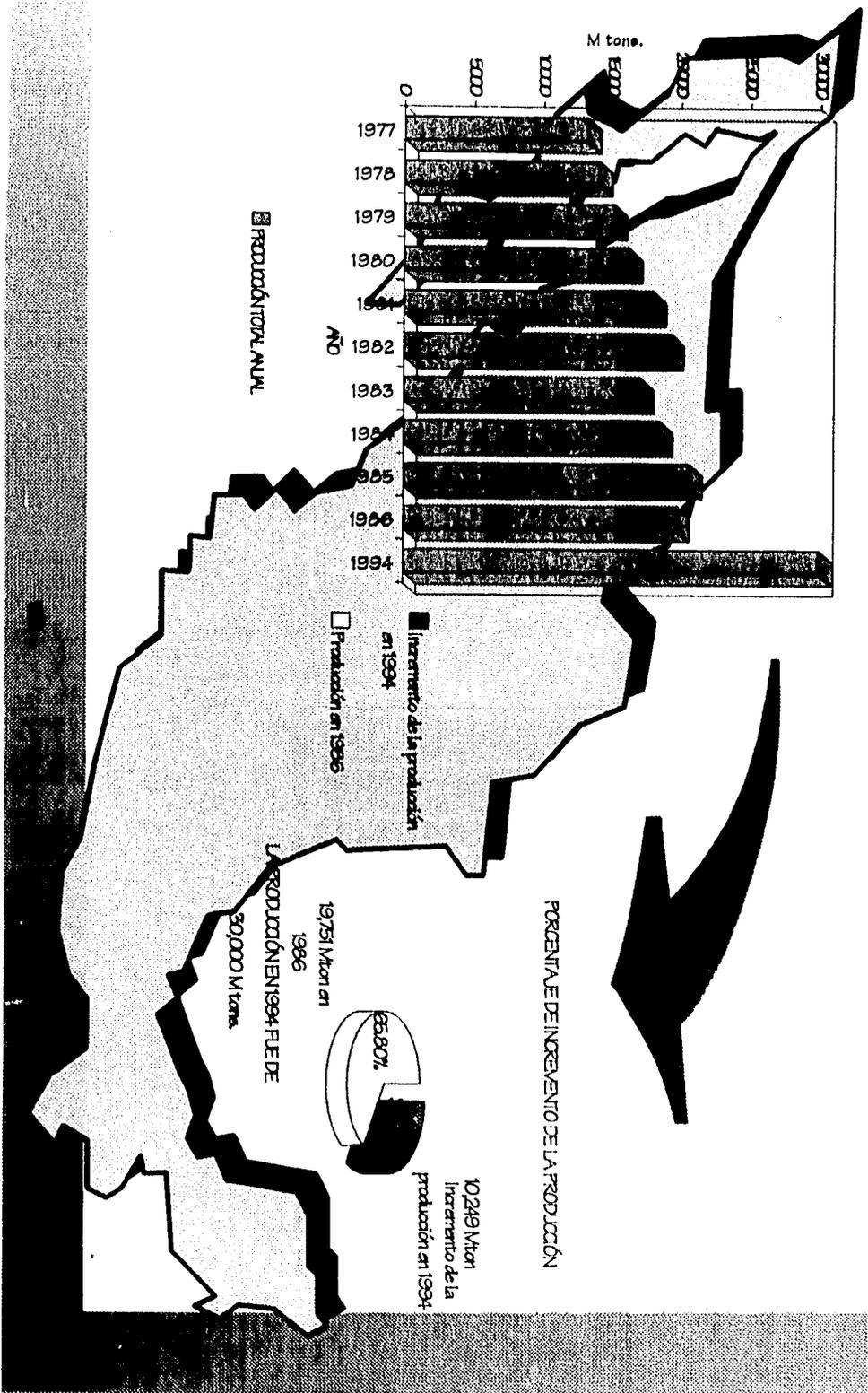
Fuente: Cámara Nacional del Cemento

UBICACIÓN DE LAS PLANTAS CEMENTERAS EXISTENTES POR ENTIDAD FEDERATIVA

Mapa 7.1



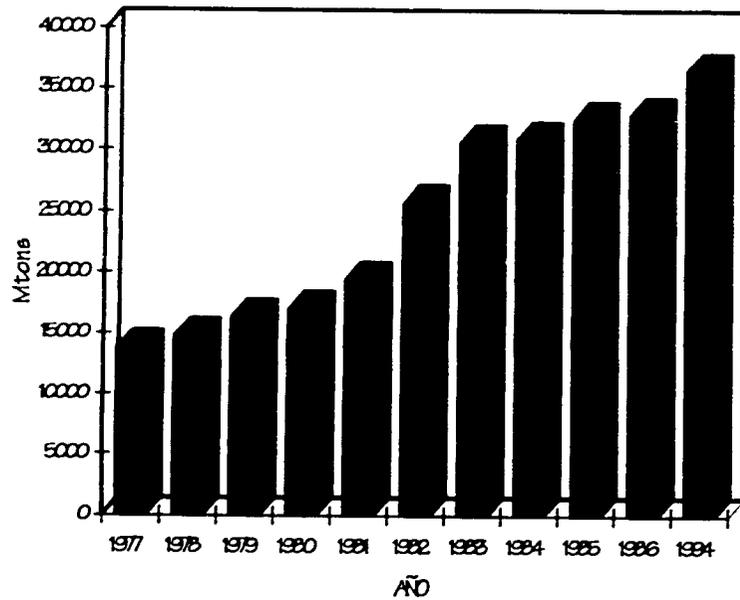
PRODUCCIÓN DE CEMENTO PORTLAND EN MÉXICO Graf. 7.1



CAPACIDAD PRODUCTIVA INSTALADA

Graf. 7.2

CAPACIDAD PRODUCTIVA INSTALADA DE CEMENTO PORTLAND



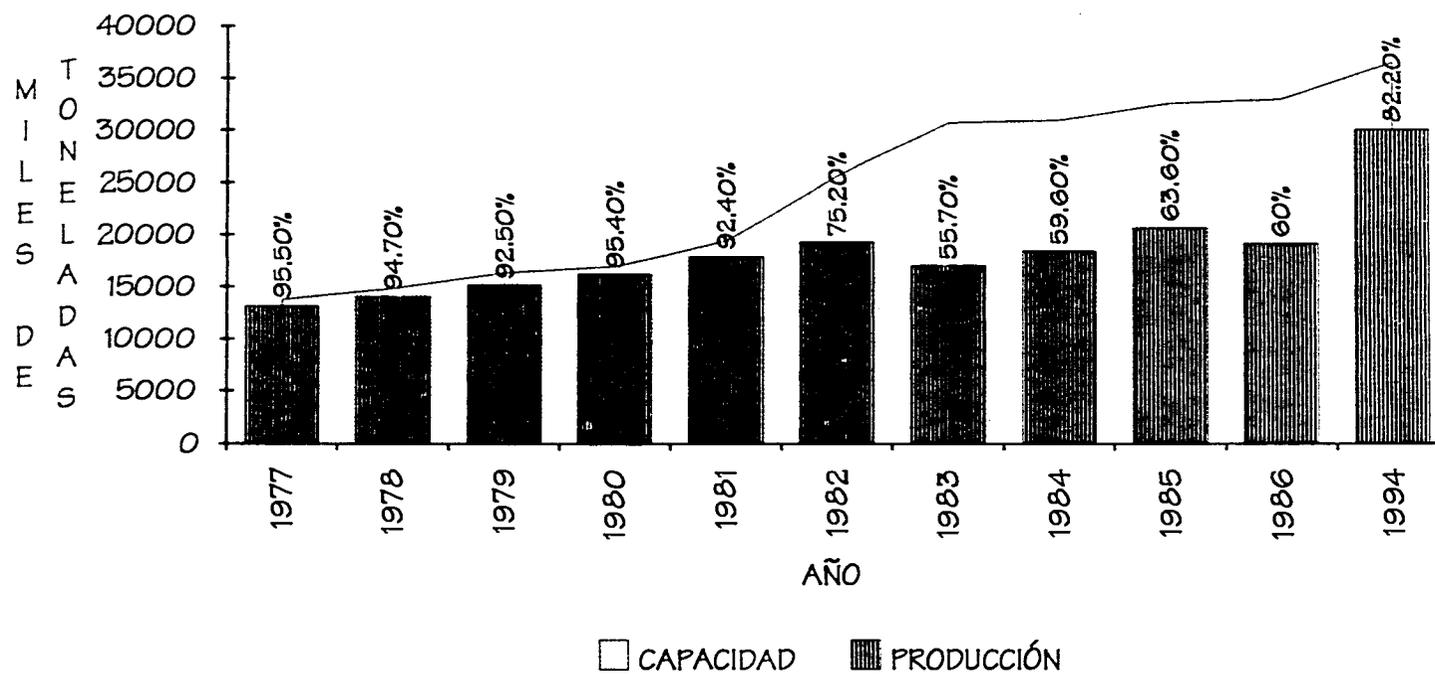
INCREMENTO DE LA CAPACIDAD INSTALADA



La capacidad instalada en 1994 fue de 36,500 Mton

APROVECHAMIENTO DE LA CAPACIDAD INSTALADA

Graf. 7.3



7.2 Consumo energético

En la actualidad, se estima que el requerimiento calorífico que deben suministrar los diversos tipos de combustibles es de 1,000 kcal/kg "clinker"²³. Este requerimiento se cubre con 90% de combustóleo (poder calorífico 10,000 kcal/kg), 8% de gas natural (poder calorífico 12,500 kcal/kg) y 2% de otros combustibles (llantas, carbón etcétera), como se muestra en la gráfica 7.4.

Debido al incremento tanto de la capacidad instalada como del aprovechamiento de dicha capacidad, el consumo energético total para la producción de 1994 ascendió a $2.88E^{13}$ kcal, distribuido de la siguiente manera:

- COMBUSTÓLEO : $2.59E^9$ Kg
- GAS NATURAL: $231.7E^6$ Kg

En la gráfica 7.5 se muestran los valores reportados de consumo de combustóleo.

Como consecuencia del aumento del uso de combustibles en las plantas de cemento, de la fuerte problemática del agotamiento de los combustibles fósiles, del impacto ambiental que éstos causan así como del incremento en el precio de dichos insumos, nuestro país requiere ahorrar energía y reemplazar sus fuentes energéticas con otras más baratas que no causen problemas secundarios a la sociedad y al ambiente. La industria del cemento es una de las que registra mayor intensidad relativa de energía y en la que los costos relacionados con ésta son una proporción importante de los costos de fabricación, por lo que la sustitución de combustibles fósiles por combustibles elaborados a partir de residuos peligrosos representa

²³ Cámara Nacional de la Industria del Cemento, Comisión de Energéticos.

7.2 Consumo energético

En la actualidad, se estima que el requerimiento calorífico que deben suministrar los diversos tipos de combustibles es de 1,000 kcal/kg "clinker"²³. Este requerimiento se cubre con 90% de combustóleo (poder calorífico 10,000 kcal/kg), 8% de gas natural (poder calorífico 12,500 kcal/kg) y 2% de otros combustibles (llantas, carbón etcétera), como se muestra en la gráfica 7.4.

Debido al incremento tanto de la capacidad instalada como del aprovechamiento de dicha capacidad, el consumo energético total para la producción de 1994 ascendió a $2.88E^{13}$ kcal, distribuido de la siguiente manera:

- COMBUSTÓLEO : $2.59E^9$ Kg
- GAS NATURAL: $231.7E^6$ Kg

En la gráfica 7.5 se muestran los valores reportados de consumo de combustóleo.

Como consecuencia del aumento del uso de combustibles en las plantas de cemento, de la fuerte problemática del agotamiento de los combustibles fósiles, del impacto ambiental que éstos causan así como del incremento en el precio de dichos insumos, nuestro país requiere ahorrar energía y reemplazar sus fuentes energéticas con otras más baratas que no causen problemas secundarios a la sociedad y al ambiente. La industria del cemento es una de las que registra mayor intensidad relativa de energía y en la que los costos relacionados con ésta son una proporción importante de los costos de fabricación, por lo que la sustitución de combustibles fósiles por combustibles elaborados a partir de residuos peligrosos representa

23 Cámara Nacional de la Industria del Cemento, Comisión de Energéticos.

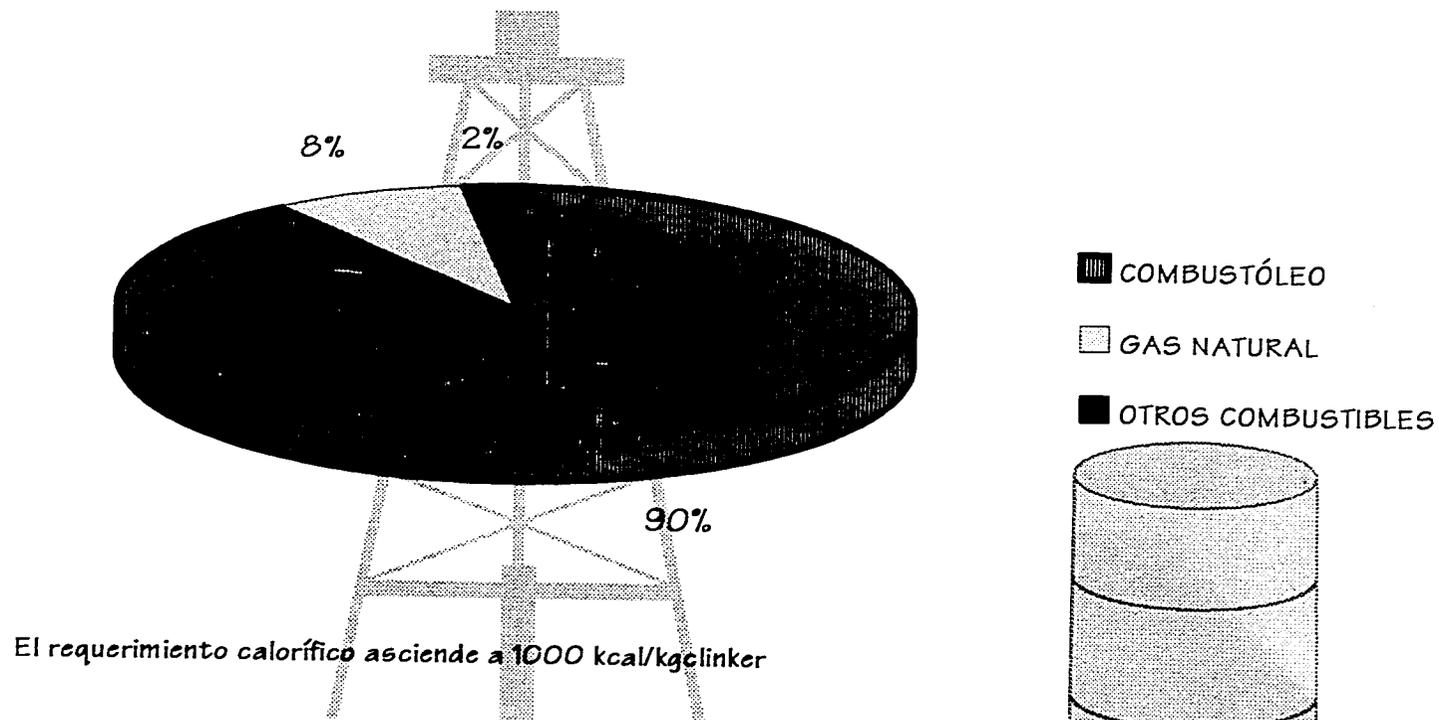
un gran beneficio tanto para la empresa productora como para el país y el ambiente.

7.3 Situación de los residuos peligrosos

Se calcula que en México se generan al menos 580,000 toneladas por día de residuos y aproximadamente el 90% proviene del sector industrial. Asimismo, las limitaciones de infraestructura para el manejo de residuos peligrosos del país sólo le permite dar una disposición segura a 4% de dicha generación, como se muestra en el diagrama 7.2.

CONSUMO DE COMBUSTIBLES

Graf. 7.4



CONSUMO DE COMBUSTÓLEO EN LA INDUSTRIA CEMENTERA MEXICANA

Graf. 7.5

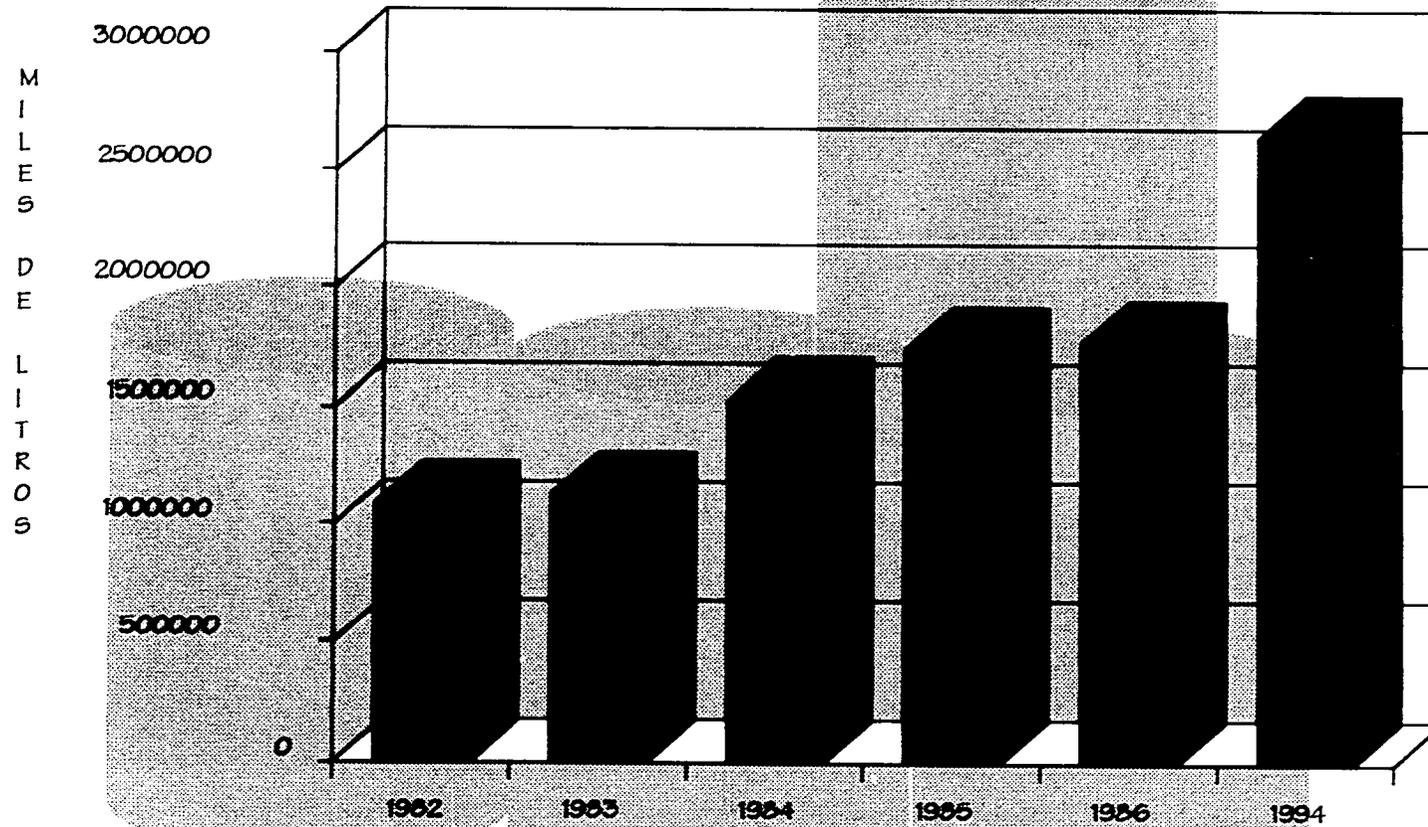
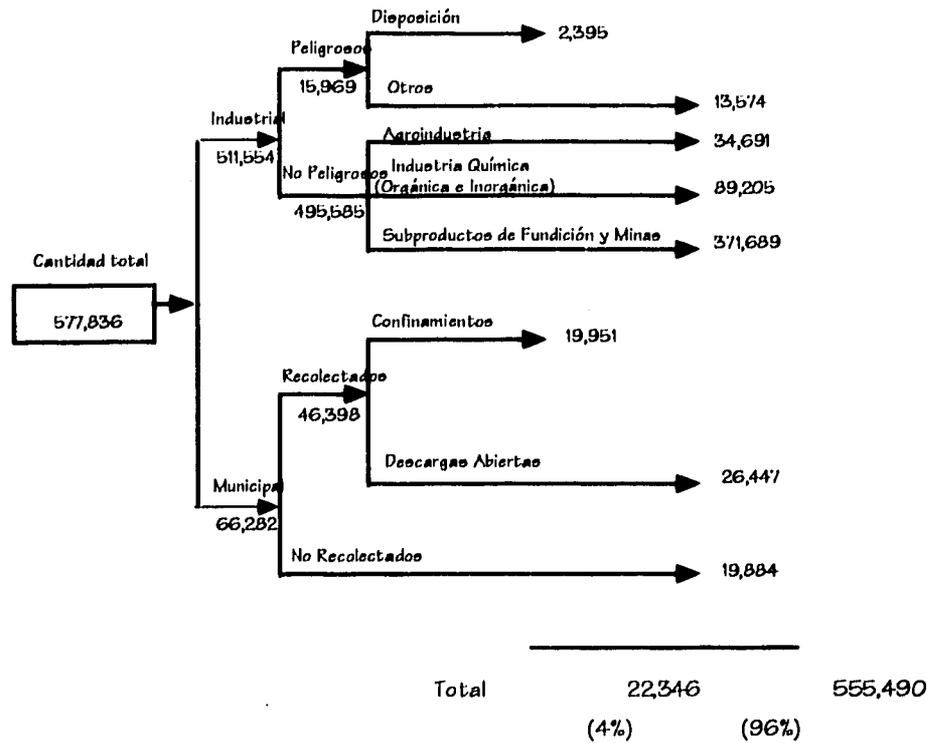


DIAGRAMA 7.2
GENERACIÓN DE RESIDUOS EN MÉXICO
TONELADAS/DÍA, 1992



Fuente: Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 1992

Los residuos peligrosos que conforman las 16,000 toneladas por día señaladas en el esquema anterior se distribuyen según lo muestra la gráfica 7.6

Las limitaciones de infraestructura para el manejo de residuos peligrosos se muestran en el siguiente listado, en el cual se consignan el número y el giro de las empresas registradas. Algunas son privadas y otras ofrecen un servicio público.

- Doce empresas para el reciclaje de solventes sucios
- Ocho empresas para el manejo de aceites lubricantes usados
- Tres confinamientos controlados de residuos peligrosos de servicio público
- Cuatro confinamientos de residuos peligrosos de servicio privado
- Dos incineradores de residuos peligrosos de servicio privado
- Seis recicladoras de metales
- Diez equipos móviles para el tratamiento "in situ" de residuos peligrosos
- Tres empresas cementeras bajo protocolo de pruebas para la recuperación de energía alternativa a partir de residuos peligrosos.
- Cuatro empresas de transporte
- Otros servicios conexos y auxiliares

No es posible, dada la información disponible, señalar las capacidades y volúmenes de operación de cada una de estas empresas; sin embargo, salvo algunas excepciones, debe decirse que se trata de instalaciones relativamente pequeñas.

7.4 Sustitución actual de combustóleo por combustible alternativo

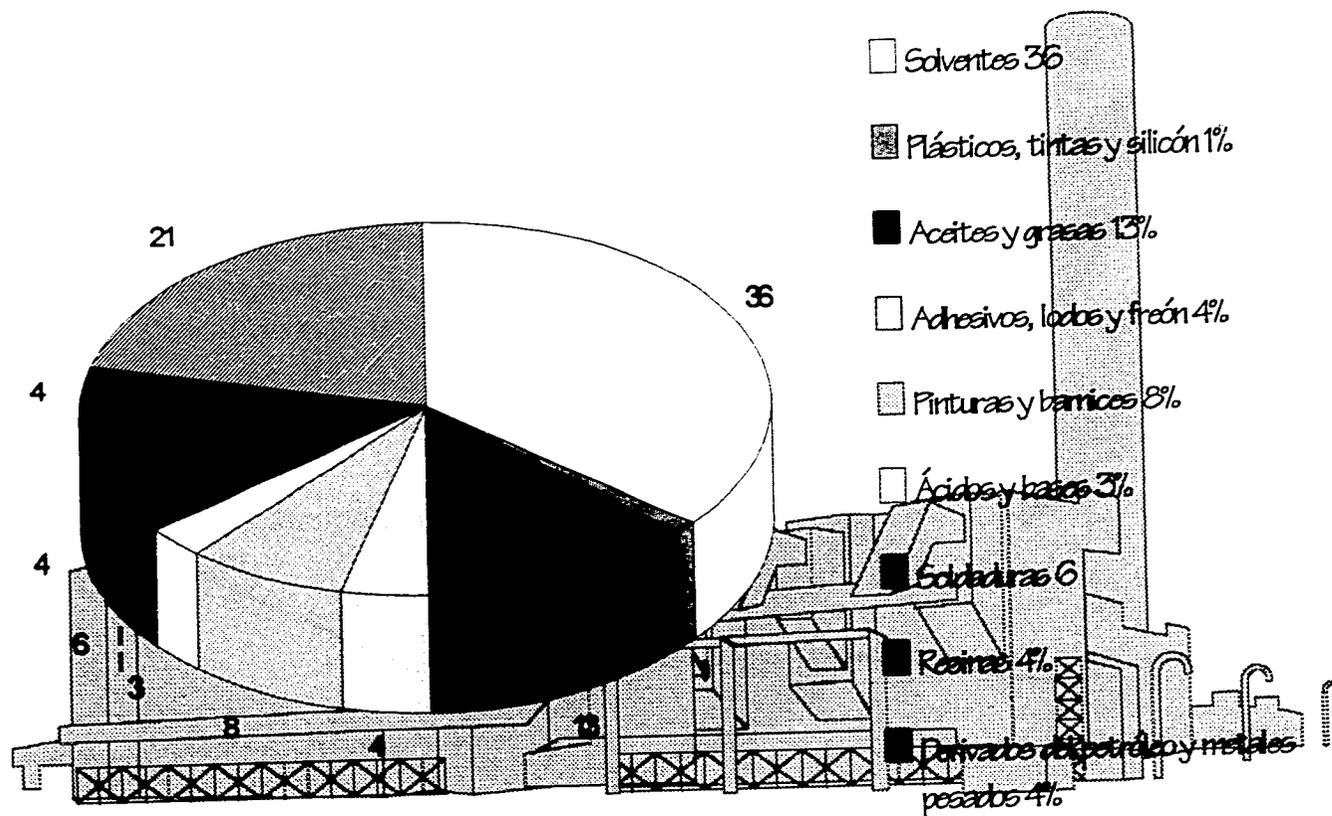
Las tres empresas cementeras, mencionadas anteriormente, bajo protocolo de pruebas para la recuperación de energía alterna a partir de residuos peligrosos cuentan con un total de cinco hornos. Cada uno de estos hornos tiene una sustitución energética parcial equivalente a 40% de combustible alternativo y 60% de combustóleo que en suma representa un poder calorífico de $6.4E+11$ kcal y $9.6E+11$ kcal respectivamente. Asimismo esta sustitución representa el 6% del total energético requerido para la producción de 30 millones de toneladas de cemento para 1994 equivalentes a $1.6E+12$ kcal como se muestra en la gráfica 7.8.

Considerando que el poder calorífico requerido para la producción de 30 millones de toneladas de cemento ascendió a $2.88E+13$ kcal, la introducción del combustible alternativo sustituyó en 2.3% a la capacidad calorífica proporcionada por el combustóleo. Si esta sustitución se implementara en los 90 hornos existentes, la demanda de combustible alternativo ascendería a $1.52E+13$ kcal equivalentes al 40% de los requerimientos energéticos totales y el requerimiento calorífico proporcionado por el combustóleo se reduciría a $1.72E+13$ kcal como se muestra en la gráfica 7.9.

Tomando en cuenta que la eficiencia del proceso es de 85%, la proporción que guarda, en términos de peso, equivale al 51% de combustible alternativo y 49% de combustóleo correspondientes a $1.79E+9$ kg y $1.73E+9$ kg respectivamente dando un peso total de $3.5E+9$ kg de combustible.

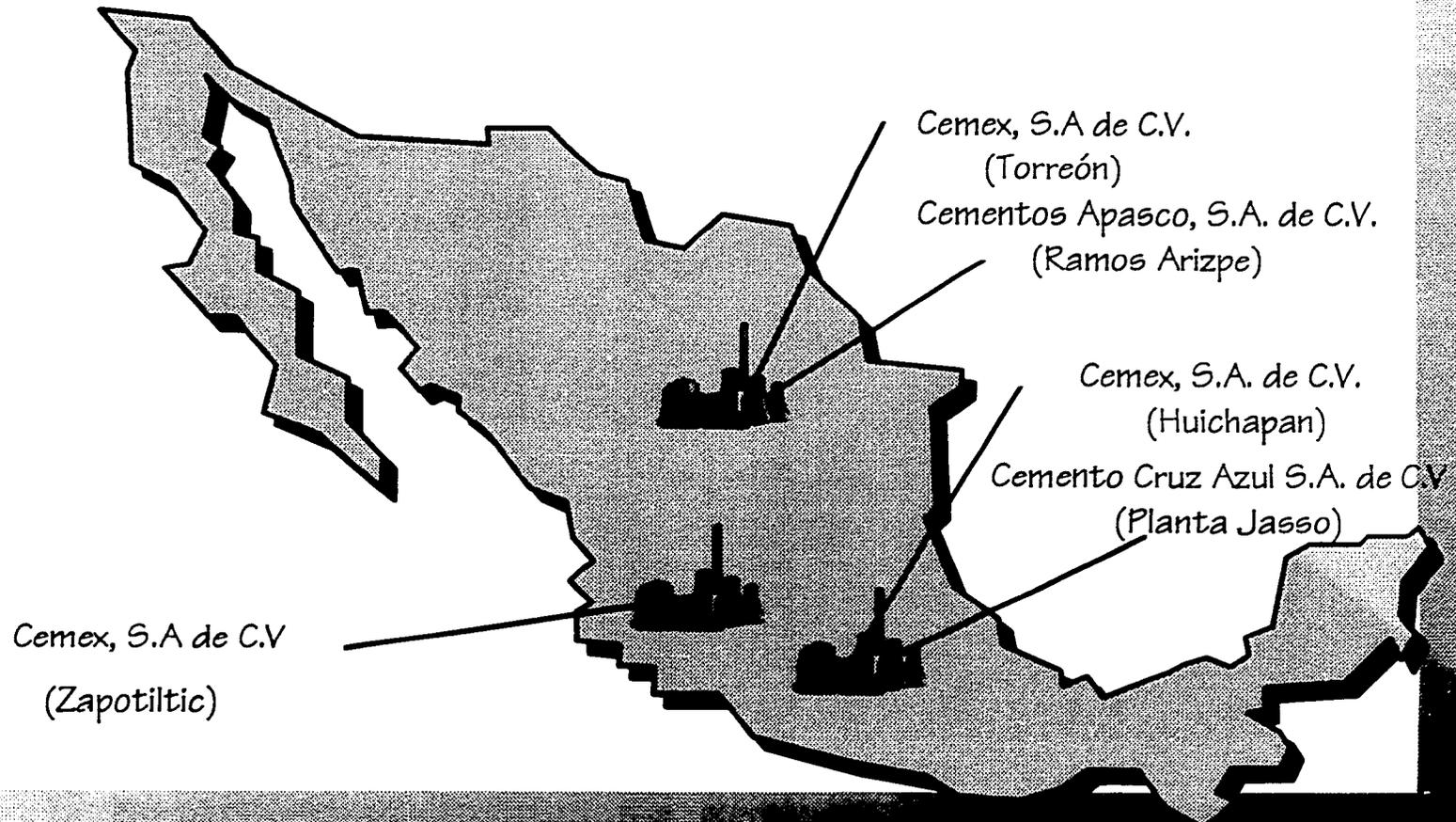
RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS CON MAYOR FRECUENCIA

Graf. 7.6



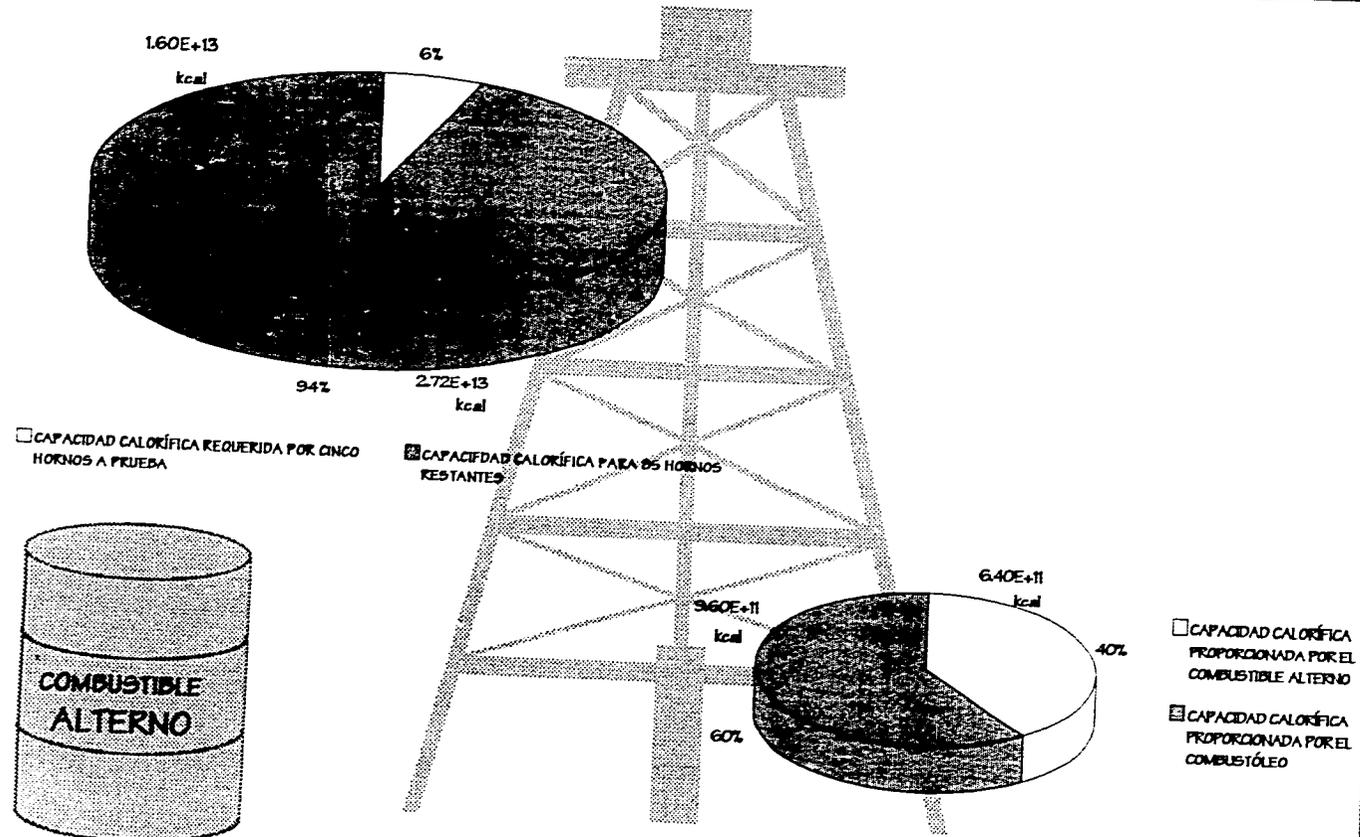
UBICACIÓN DE LAS PLANTAS CEMENTERAS RECUPERADORAS DE ENERGÍA EN PROTOCOLO DE PRUEBA

Mapa 7.2



SUSTITUCIÓN DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA

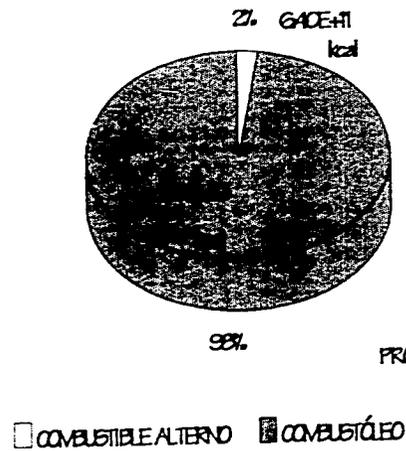
Graf. 7.7



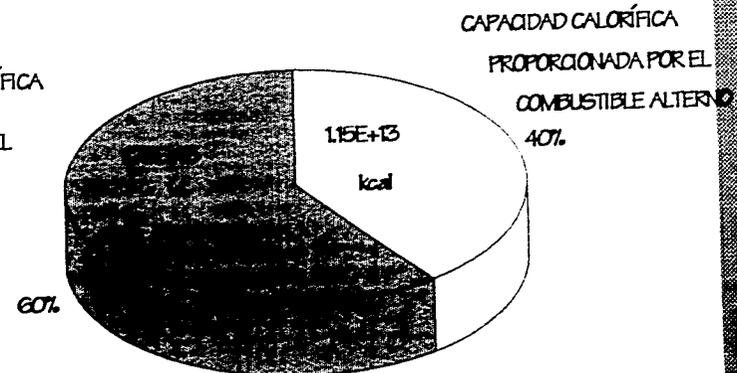
SUSTITUCIÓN ENERGÉTICA ACTUAL Y PROYECCIÓN A LOS 90 HORNOS EXISTENTES

Graf. 7.8

SUSTITUCIÓN ACTUAL DE COMBUSTÓLEO POR COMBUSTIBLE ALTERNÓ



PROYECCIÓN DE LA SUSTITUCIÓN ENERGÉTICA DEL 40% EN LOS 90 HORNOS
EXISTENTES EN 1994



EL REQUERIMIENTO ENERGÉTICO TOTAL PARA 1994 FUE DE 2.88E13 kcal

CAPÍTULO VIII

JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

México se enfrenta en este momento al problema de encontrar soluciones a mediano y largo plazos para el manejo de sus residuos peligrosos, por lo que es importante considerar alternativas viables que proporcionen un beneficio tanto social como económico. Hoy en día la implementación de la sustitución parcial de combustóleo por combustible alterno en hornos de cemento es una alternativa que cumple con las expectativas solicitadas por lo cual, un número cada vez mayor de cementeras lo están implementando.

El uso de residuos peligrosos como combustible alterno enfoca sus estrategias hacia la disminución de la probabilidad de que se presenten efectos adversos en el ambiente y en la salud pública provocados por estos residuos así como, un ahorro en el consumo de combustibles fósiles cada día más escasos.

En el sector de la protección ambiental, el análisis costo beneficio es el método mediante el cual se evalúa las conveniencias del proyecto. Este análisis es una valoración de los distintos beneficios que el proyecto puede generar, en comparación con los costos asociados al mismo. Identificar y medir los costos y los beneficios resulta complicado puesto que se involucran variables muy heterogéneas, a las cuales es difícil asignarles valor. La interpretación y la asignación correcta de este tipo de costos y beneficios requiere de un análisis más profundo por lo cual en este capítulo únicamente se hará referencia a la justificación económica del proyecto sin tomar en consideración las variables que podrían manejarse en el análisis costo-beneficio.

8.1 Ahorro económico obtenido de la implementación de la sustitución parcial de combustible alternativo en un horno de cemento.

En la industria cementera se pueden encontrar hornos con diferentes capacidades de producción, debido a esto y con la finalidad de generalizar la implementación de la sustitución parcial de combustóleo por combustible alternativo se tomaron datos generales promedio que se muestran en la tabla 8.1.

El precio reportado de los combustibles empleados es el siguiente:

- Combustóleo: \$0.065 USD/kg¹
- Combustible alternativo: \$ 0.0416 USD/kg²

En la tabla 8.2 se muestra la implementación de un programa de sustitución de combustóleo por combustible alternativo. Esta implementación se logra en un periodo de dos años y medio teniendo un incremento de sustitución de 16% anual hasta llegar al 40% de sustitución (sustitución máxima que se puede lograr sin afectar las condiciones de operación). Tomando en cuenta que el costo del combustible alternativo en comparación con el combustóleo representa un ahorro de 36% para el consumidor, el incremento en la sustitución trae como consecuencia una disminución gradual en los costos de combustibles reflejados en un ahorro como lo muestra la gráfica 8.1. Los costos de combustóleo, combustible alternativo y combustible sustituido se muestran en la tabla 8.2 y se esquematizan en la gráfica 8.2.

¹ PEMEX. Gerencia de Comercialización Zona Centro.

² Química Omega, S.A de C.V. Programa de combustible alternativo

Para poder implementar el programa de sustitución parcial se requiere de una inversión inicial aproximada de \$1,100,000.00 USD, la cual incluye el equipo de monitoreo continuo para emisiones que tiene un costo aproximado de \$766,500.00 USD.

La recuperación de la inversión se lleva a cabo en un periodo de dos años y medio como se muestra en la tabla 8.3.

TABLA 8.3
RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

AÑO	RECUPERACIÓN
0	-1,100,000
1	-912,112
2.5	27,329
3	277,847
4	528,365
5	778,883

Fuente: INE. Protocolo de pruebas de combustibles alternos 1995.
Química Omega S.A de C.V

En la gráfica 8.3 se esquematiza la recuperación de la inversión.

DATOS GENERALES PARA UN HORNO DE CEMENTO

Tabla. 8.1

	Capacidad instalada	Capacidad aprovechada
Producción ton/año	405,556	333,333
Requerimiento calorífico kcal	3.90E+11	3.20E+11
Combustóleo kg (90%)	35,555,556	28,777,778
Gas natural Kg (10%)	2,510,444	2,574,444
Costo de combustóleo USD	2,311,111	1,870,556

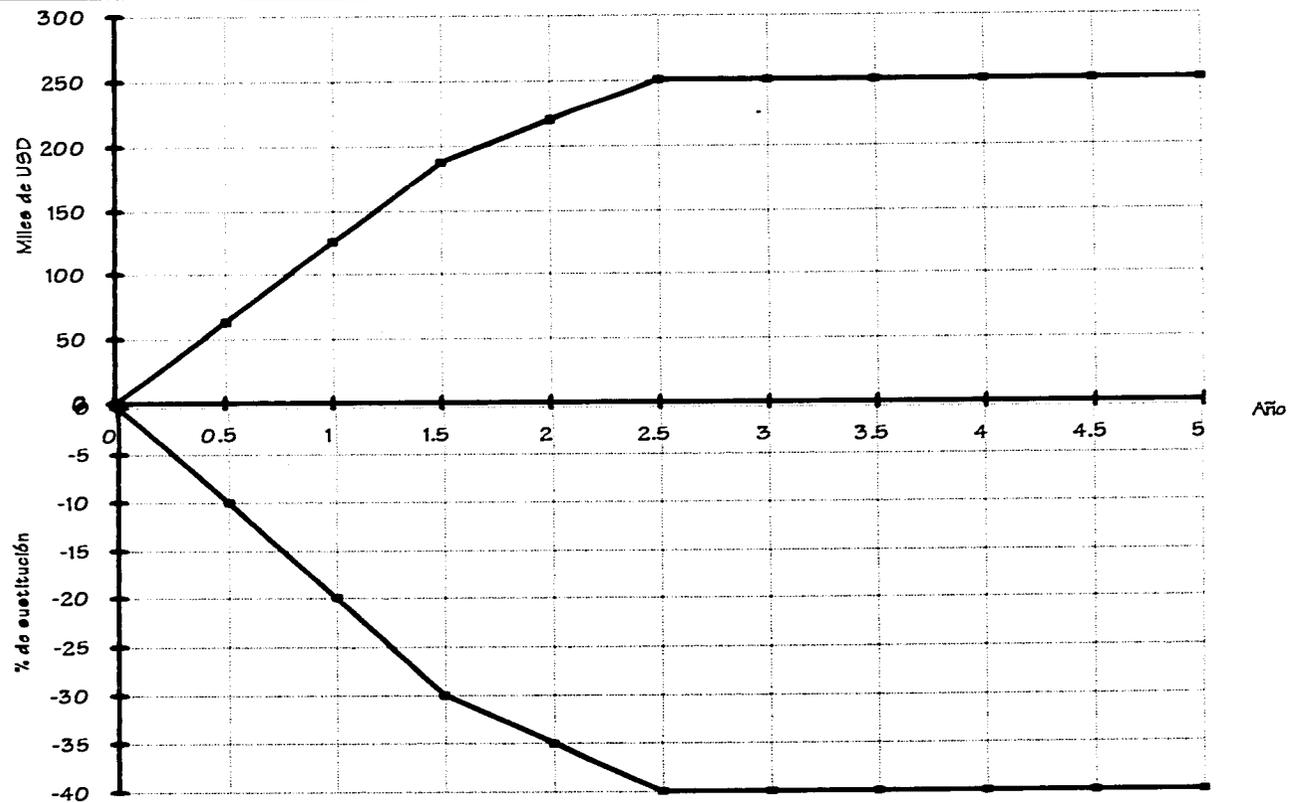
IMPLEMENTACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DE COMBUSTÓLEO POR COMBUSTIBLE ALTERNO

Tabla 8.2

% de combustible alternativo sustituido	% de combustóleo empleado	Costo de combustible alternativo USD	Costo de combustóleo USD	Costo del combustible sustituido USD	AHORRO USD
0	100	0	2,535,000	2,535,000	0
5	95	95,435	2,408,250	2,503,685	31,315
10	90	190,871	2,281,500	2,472,371	62,629
15	85	286,306	2,154,750	2,441,056	93,944
20	80	381,741	2,028,000	2,409,741	125,259
25	75	477,176	1,901,250	2,378,426	156,574
30	70	572,612	1,774,500	2,347,112	187,888
35	65	668,047	1,647,750	2,315,797	219,203

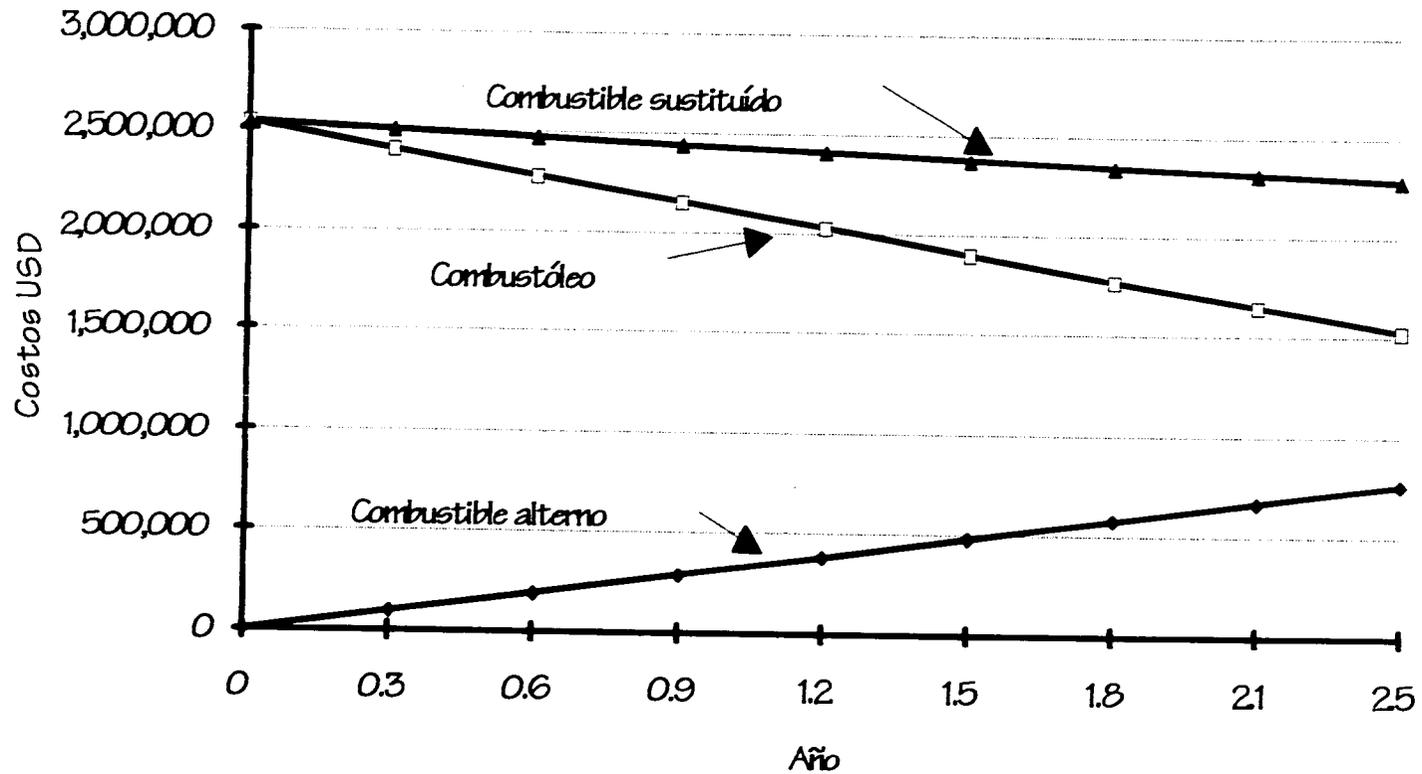
AHORRO ESTIMADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE ALTERNO

Graf. 8.1



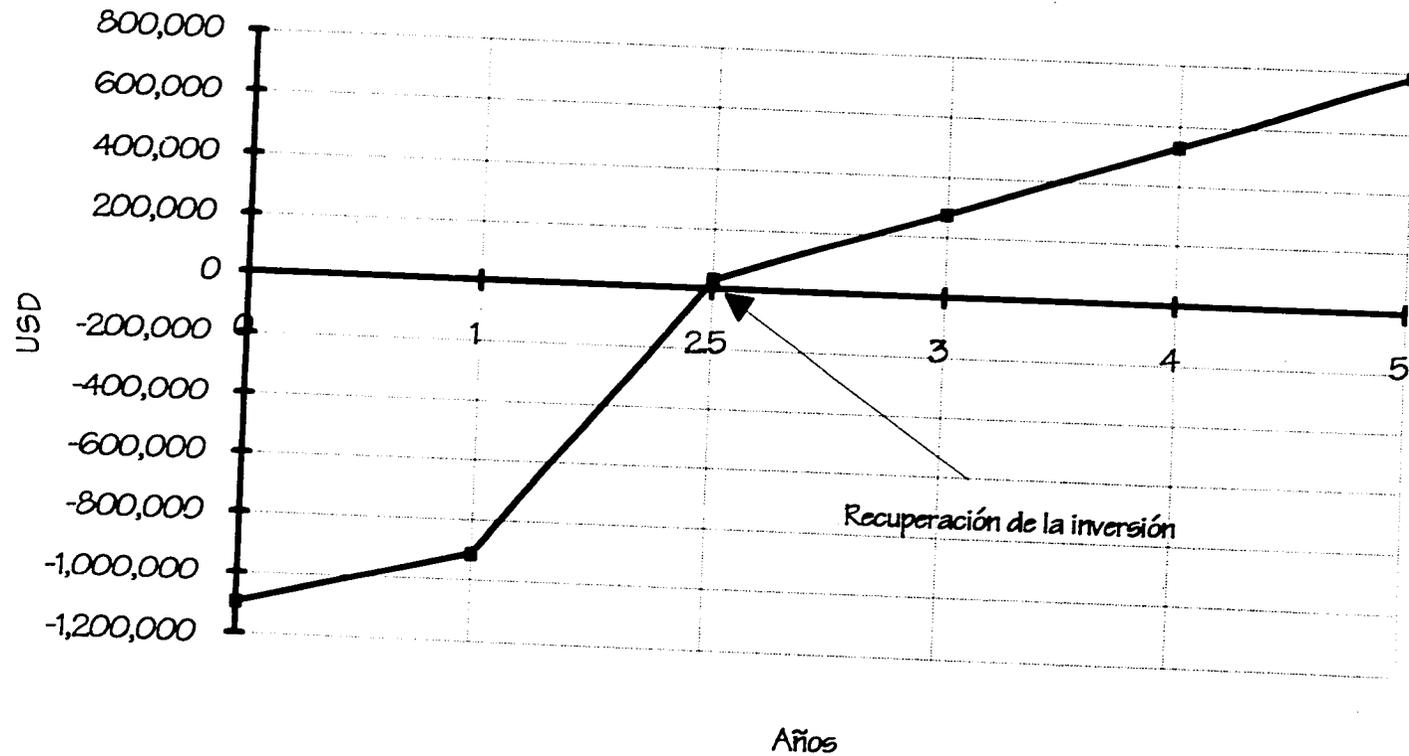
COSTO DE COMBUSTIBLES DURANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL

Graf. 8.2



TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Graf. 8.3



8.2 Ahorro económico proyectado en la implementación de la sustitución parcial de combustible alternativo en los noventa hornos existentes en México

En México existen noventa hornos para la fabricación de cemento, dichos hornos cuentan con una capacidad instalada de producción de 36,500,000 ton/año y un aprovechamiento de la capacidad instalada de 82%. El consumo energético requerido para esta producción es de $3.51E^{13}$ kcal/año las cuales eran cubiertas por $3.2E^9$ kg de combustóleo y $282E^6$ kg de gas natural hasta el inicio de la implementación de la sustitución parcial de combustóleo por combustible alternativo.

En las tablas 8.4 se muestran los costos de combustible alternativo y combustóleo en función de diversos porcentajes de sustitución total. El ahorro que se calcula en las diferentes sustituciones se logra en un periodo aproximado de dos años y medio.

En la gráfica 8.4 se muestran las tendencias de algunas de las sustituciones posibles con el ahorro correspondiente al periodo de sustitución.

15 % DE SUSTITUCIÓN DE COMBUSTÓLEO
POR COMBUSTIBLE ALTERNO

Tabla 8.4

AÑO	Sustitución %	Costo combustible alterno USD	Costo combustóleo USD	AHORRO
0	0	0	205,335,000	0
1	6	9,276,311	193,014,900	3,043,789
2	12	18,552,621	180,694,800	6,087,579
2.5	15	23,190,776	174,534,750	7,609,474
3	15	23,190,776	174,534,750	7,609,474
4	15	23,190,776	174,534,750	7,609,474

20 % DE SUSTITUCIÓN DE COMBUSTÓLEO
 POR COMBUSTIBLE ALTERNO

Tabla 8.4

AÑO	Sustitución %	Costo combustible USD alterno USD	Costo combustóleo USD	AHORRO USD
0	0	0	205,335,000	0
1	8	12,368,414	188,908,200	4,058,386
2	16	24,736,828	172,481,400	8,116,772
2.5	20	30,921,035	164,268,000	10,145,965
3	20	30,921,035	164,268,000	10,145,965
4	20	30,921,035	164,268,000	10,145,965
5	20	30,921,035	164,268,000	10,145,965

25 % DE SUSTITUCIÓN DE COMBUSTÓLEO
POR COMBUSTIBLE ALTERNO

Tabla 8.4

AÑO	Sustitución %	Costo combustible alterno USD	Costo combustóleo USD	AHORRO USD
0	0	0	205,335,000	0
1	10	15,460,518	184,801,500	5,072,982
2	20	30,921,035	164,268,000	10,145,965
2.5	25	38,651,294	154,001,250	12,682,456
3	25	38,651,294	154,001,250	12,682,456
4	25	38,651,294	154,001,250	12,682,456
5	25	38,651,294	154,001,250	12,682,456

30 % DE SUSTITUCIÓN DE COMBUSTÓLEO
POR COMBUSTIBLE ALTERNO

Tabla 8.4

AÑO	Sustitución %	Costo combustible alterno USD	Costo combustóleo USD	AHORRO USD
0	0	0	205,335,000	0
1	12	18,552,621	180,694,800	6,087,579
2	24	37,105,242	156,054,600	12,175,158
2.5	30	46,381,553	143,734,500	15,218,947
3	30	46,381,553	143,734,500	15,218,947
4	30	46,381,553	143,734,500	15,218,947
5	30	46,381,553	143,734,500	15,218,947

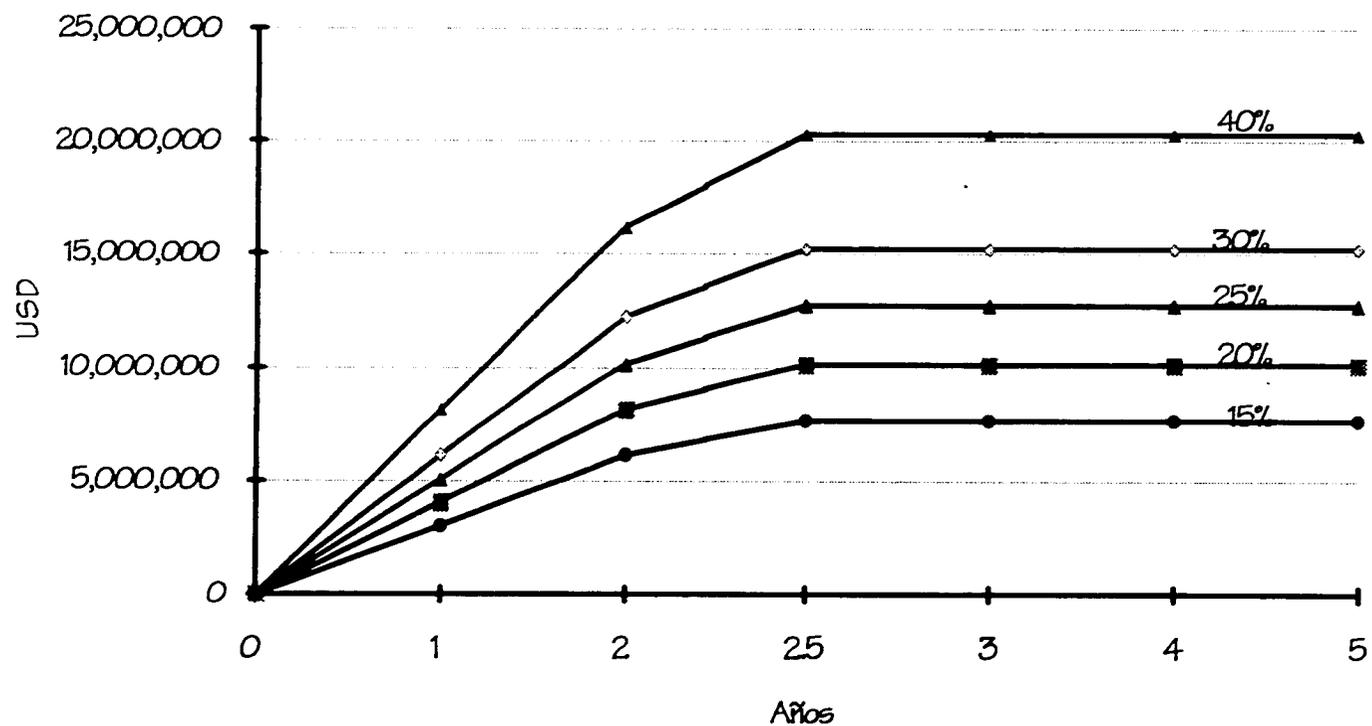
40 % DE SUSTITUCIÓN DE COMBUSTÓLEO
POR COMBUSTIBLE ALTERNO

Tabla 8.4

AÑO	Sustitución %	Costo combustible alterno USD	Costo combustóleo USD	AHORRO USD
0	0	0	205,335,000	0
1	16	24,736,828	172,481,400	8,116,772
2	32	49,473,656	139,627,800	16,233,544
2.5	40	61,842,071	123,201,000	20,291,929
3	40	61,842,071	123,201,000	20,291,929
4	40	61,842,071	123,201,000	20,291,929
5	40	61,842,071	123,201,000	20,291,929

AHORRO PROYECTADO PARA 90 HORNOS CON POSIBLES PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN

Graf. 8.4



8.2.1 Proyección de la tendencia del uso de combustibles alternos en E.E.U.U. en los noventa hornos existentes en México

De acuerdo con las tendencias mundiales, todos los generadores de residuos peligrosos tienen la obligación de pagar por la disposición de sus residuos. En México el generador paga por el confinamiento controlado o por la venta de sus residuos a una empresa de manejo que se encarga de la elaboración de combustible alternativo a partir de dichos residuos. Esta empresa, a su vez, vende el combustible a las industrias del cemento, las cuales ya tuvieron que haber hecho una inversión inicial para la instalación del equipo de inyección del nuevo combustible.

En los países industrializados como es el caso de los E.E.U.U. las industrias del cemento cobran a los generadores por quemar sus residuos peligrosos en forma de combustible alternativo, es decir, para la cementera el quemado de dichos residuos significa un ganancia extra y un ahorro en el consumo de su combustible tradicional.

Tomando en cuenta que la tendencia en E.E.U.U. es el cobro al generador por el quemado de sus residuos peligrosos en hornos de cemento, México podría adoptar dicha tendencia en beneficio de el uso de fuentes energéticas alternas, de la disminución de residuos peligrosos confinados, de la economía de las industrias cementeras y de la sociedad en general.

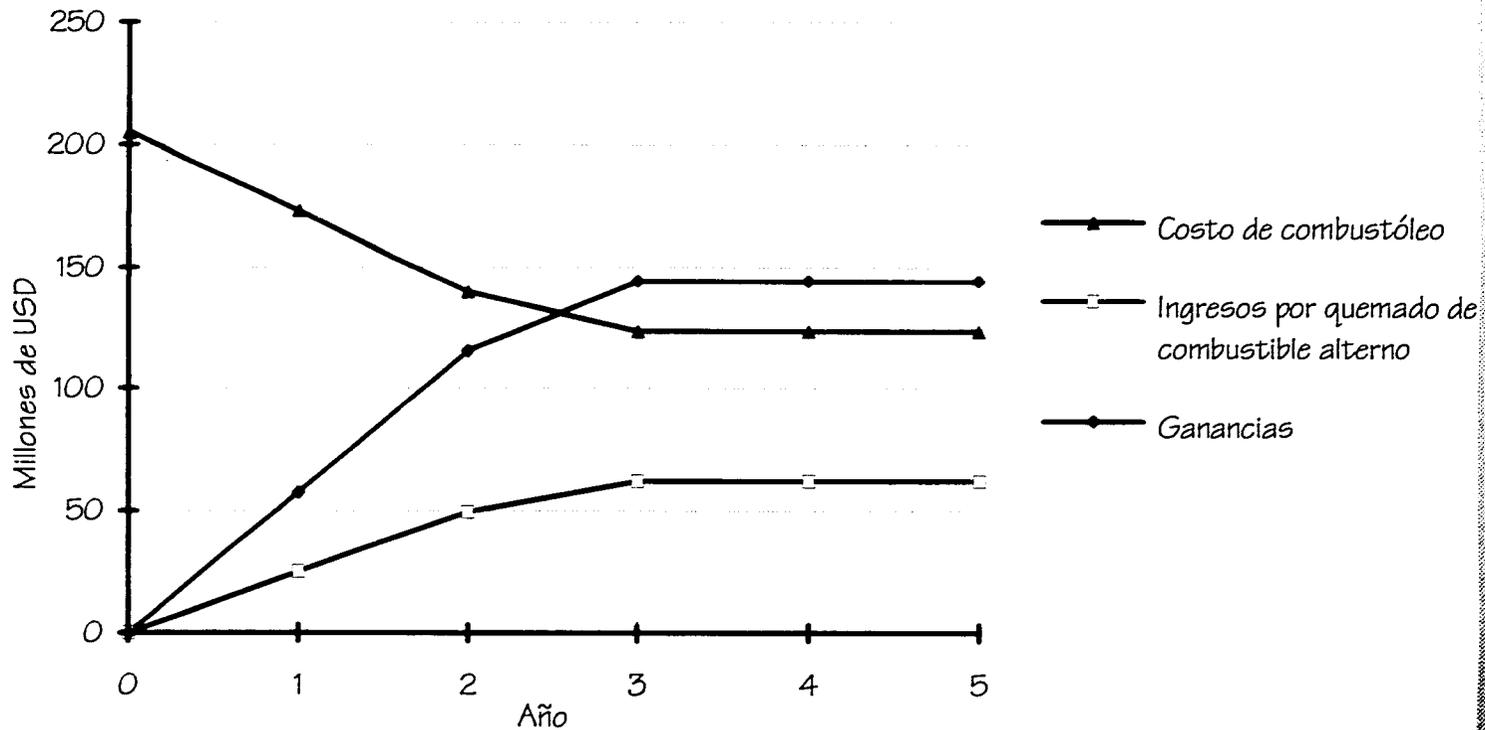
Si los noventa hornos cementeros existentes en México cobraran por el quemado de residuos peligrosos, la recuperación de la inversión se lograría en un período más corto obteniéndose ganancias mayores a corto plazo como se muestra en la tabla y gráfica 8.5.

GANANCIAS PROYECTADAS SIGUIENDO LA TENDENCIA DE E.E.U.U PARA LOS 90 HORNOS EXISTENTES EN MÉXICO Tabla 8.5

Año	Sustitución %	Costo de combustóleo USD	Ingresos por quemado de combustible alternativo USD	Ganancias USD
0	0	205,335,000	0	0
1	16	172,481,400	24,736,828	57,590,428
2	32	139,627,800	49,473,656	115,180,856
3	40	123,201,000	61,842,071	143,976,071
4	40	123,201,000	61,842,071	143,976,071
5	40	123,201,000	61,842,071	143,976,071

PROYECCIÓN DE LAS GANANCIAS OBTENIDAS SIGUIENDO LAS TENDENCIAS DE DISPOSICIÓN EN E.E.U.U

Graf. 8.5



Proyección estimada para los 90 hornos existentes en México

8.3 Valor agregado en el uso de combustible alternativo

Actualmente en México se generan 5,840,000 ton/año de residuos peligrosos. Debido a la infraestructura instalada únicamente se le puede dar un manejo adecuado a 876,500 ton/año, es decir, 15% de la generación total; del resto no se conoce con exactitud el manejo que se les da y es sabido que en ocasiones se incurre en prácticas irregulares.

La alternativa de emplear residuos peligrosos para la obtención de combustibles alternos, utilizados en la industria del cemento con una sustitución parcial de combustible alternativo por combustóleo equivalente a 40%, contribuiría a la disminución de la generación total de residuos peligrosos en un 25%, que aunado, al 15% de manejo seguro proporcionado por la infraestructura existente, genera una disposición segura del 40% del total de residuos peligrosos generados como se muestra en la gráfica 8.6

El volumen equivalente al 25% de residuos peligrosos empleados como combustible alternativo asciende a 1.5368E12 lt/año. El costo aproximado de emplear para su disposición un confinamiento controlado* o su uso como combustible alternativo es el siguiente y se muestra en la gráfica 8.7.

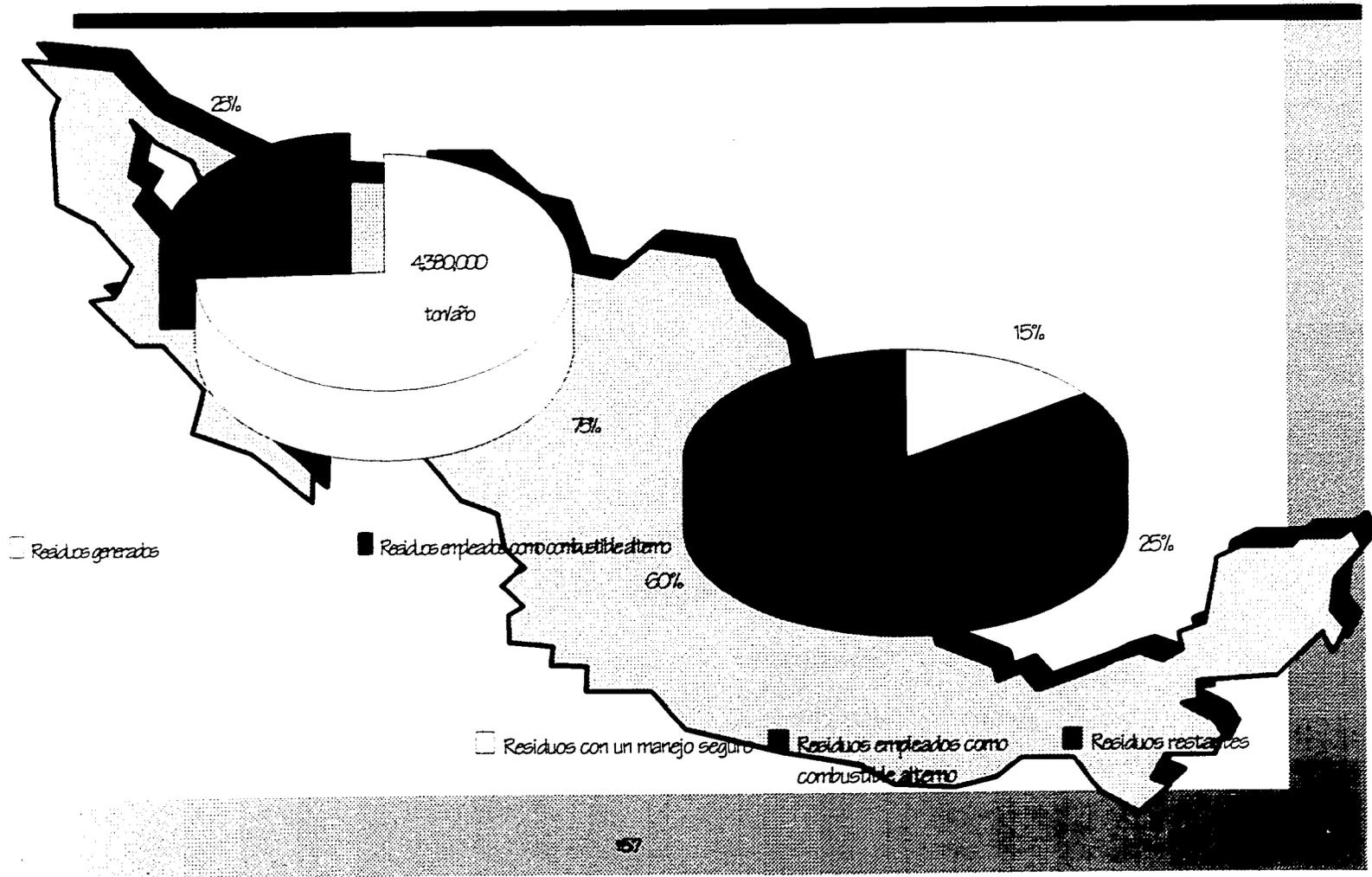
- Confinamiento controlado: desde \$0.30 USD hasta \$0.81 USD
- Combustible alternativo: desde \$ 0.20 USD hasta \$0.41 USD

* Aunque tecnológicamente no se deben confinar este tipo de materiales, actualmente en México, es una práctica común y que va en contra de las disposiciones ambientales, incluso a nivel internacional

Asimismo el ahorro que implica el consumo de combustibles alternos comparado con el costo de mandar estos residuos a un confinamiento controlado se muestra en la gráfica 8.7

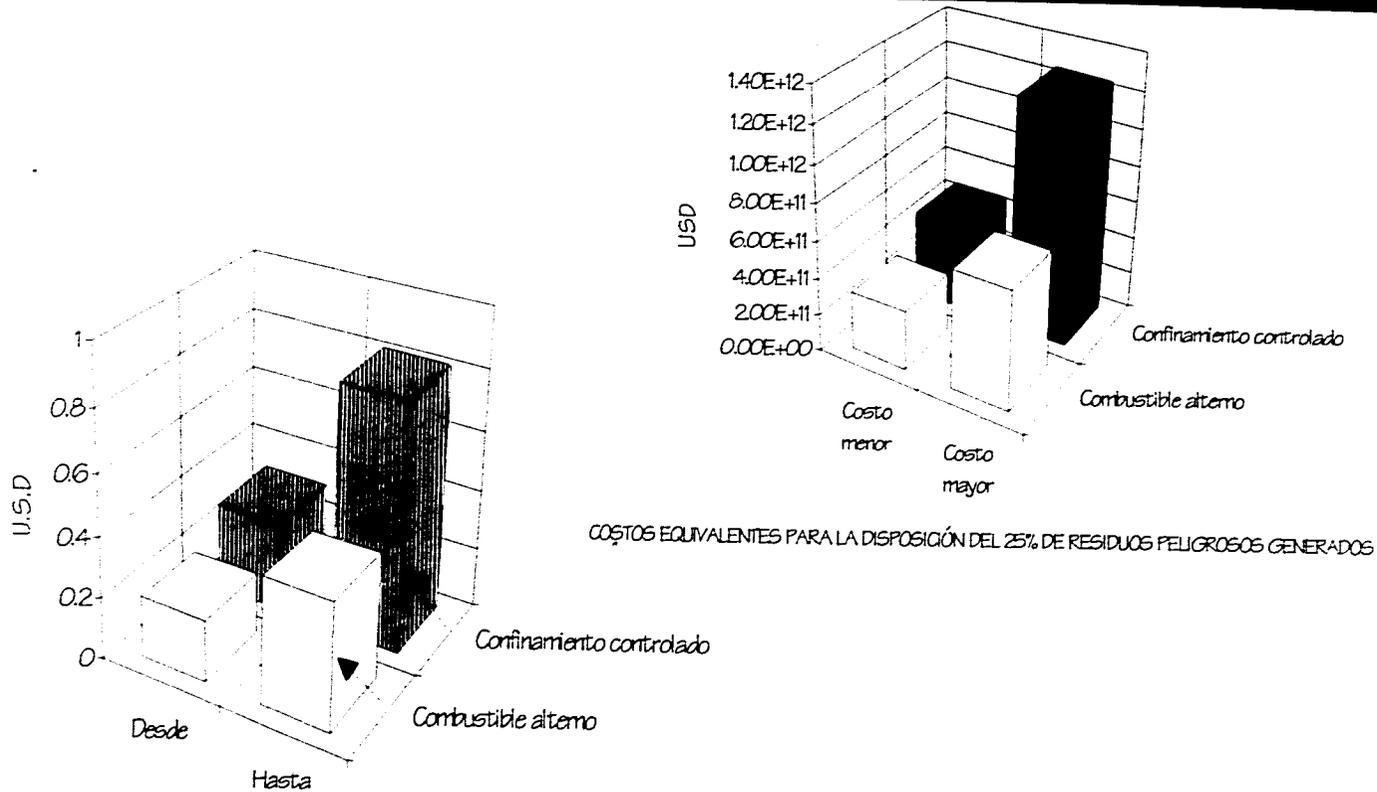
DISTRIBUCIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

Graf. 8.6



COMPARACIÓN DE LOS COSTOS ENTRE EL USO DE COMBUSTIBLE ALTERNO O EL CONFINAMIENTO CONTROLADO

Graf. 8.7



COSTOS EQUIVALENTES PARA LA DISPOSICIÓN DEL 25% DE RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS

COSTO DE LAS POSIBLES DISPOSICIONES DE RESIDUOS PELIGROSOS POR LITRO

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La industria insume materias primas, energía, capital y trabajo humano para generar bienes socialmente deseables, pero también sus procesos productivos arrojan subproductos indeseables para los cuales generalmente no hay precios positivos ni mercados. Entre ellos se encuentra los residuos peligrosos, de éstos el volumen desborda las capacidades biofísicas e institucionales de asimilación, manejo y disposición segura, convirtiéndose en un gran reto de gestión industrial y de política ambiental.

La sociedad moderna, al verse obligada a reconsiderar sus sistemas de desarrollo a fin de consolidar un modelo sustentable que no ponga en riesgo los recursos naturales y el ambiente, ha descubierto las ventajas económicas de hacer uso intensivo de los materiales, de ahorrar energía y de prevenir daños ambientales.

Se estima que se generan en nuestro país cerca de cinco millones de toneladas anuales de residuos peligrosos. Dada la desproporción que guarda el volumen creciente de residuos peligrosos generados con las capacidades existentes de manejo, vigilancia, control y disposición, con frecuencia se observa una disposición clandestina en tiraderos municipales, barrancas, drenajes municipales, etcétera. Se cree que esta última opción es la que predomina, considerando que cerca del 90% de los residuos peligrosos adoptan estados líquidos, acuosos o semilíquidos, o bien se solubilizan y/o mezclan en las descargas de aguas residuales.

La creciente industria y el consecuente incremento en la producción de residuos peligrosos ha creado un problema en cuanto al destino que se les debe dar a éstos; por ello es necesario tener buen control y manejo de estos materiales considerando las graves implicaciones resultantes de una disposición inadecuada.

Las alternativas tecnológicas actuales para un manejo adecuado pueden concentrarse en cuatro grupos: reducción de la generación, recuperación y reciclaje, tratamientos (físicos, químicos, biológicos y térmicos), y disposición final. Todas estas alternativas se traducen en procesos productivos más eficientes, capaces de economizar energía y aprovechar mejor las materias primas, así como disminuir la generación de residuos peligrosos reduciendo con ello los costos de manufactura y respetando la salud del ser humano y el ambiente.

Las normas y regulaciones aplicables a la disposición y manejo de residuos peligrosos son cada vez más estrictas, y por tanto, se observa un incremento exponencial en los costos asociados a su manejo ambientalmente seguro. Con esto podemos darnos cuenta de la magnitud del problema de los residuos peligrosos y de la urgente necesidad de desarrollar alternativas tecnológica y económicamente viables, de reorientar procesos industriales, de crear nuevas actividades y mercados, así como de concientizar al industrial para reciclar y reutilizar al máximo los materiales.

Dentro de las alternativas de destrucción térmica se encuentran calderas industriales, hornos de fabricación de cal y hornos de fabricación de cemento; siendo estos últimos los que presentan mejores condiciones para lograr una destrucción eficiente de los residuos peligrosos aprovechando al máximo la energía que éstos proporcionan.

Existen cuatro principales factores que ha jugado un papel muy importante en la inducción de procesos de innovación tecnológica como lo es el reuso de residuos peligrosos como combustible alternativo para hornos de cemento:

- a) El impacto causado por el alza de los precios de los derivados del petróleo en México.

- b) La regulaciones y lo introducción de instrumentos económicos para alcanzar metas ambientales
- c) La elevación de los costos para el tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos.
- d) El desacoplamiento del consumo de energía y el crecimiento de la producción industrial.

Todos estos factores aunados a la problemática causada por la generación de residuos peligrosos y la insuficiente infraestructura instalada en nuestro país para el tratamiento y disposición segura de dichos residuos, nos obliga a la modificación de las tendencias, a la apertura y adaptación de tecnologías, así como a la formulación de planes de solución a nivel nacional.

Debido a las condiciones de operación (temperaturas elevadas y prolongados tiempos de residencia) y al proceso en sí; los hornos utilizados en la fabricación del cemento, son una alternativa viable de destrucción térmica para los residuos peligrosos, y éstos a su vez una fuente de energía alterna para los hornos. La operación y el control adecuados del proceso brindan la garantía de una disposición segura de residuos peligrosos sin incremento en las emisiones a la atmósfera.

Las conclusiones obtenidas de la implementación de esta alternativa tecnológica, se pueden resumir en los siguientes puntos:

- La infraestructura instalada en México para el manejo y disposición segura de residuos peligrosos hoy en día sigue siendo insuficiente; la generación de residuos peligrosos aumenta día con día.

- Las tendencias actualmente empleadas en el mundo son el reuso y el reciclaje de materiales en general, puesto que con estas se logra una disminución en los costos de disposición final así como el máximo aprovechamiento de los materiales.
- El reuso de residuos peligrosos como combustible alterno en los hornos de cemento además de ser posible no provoca ningún efecto adverso en la calidad del cemento por el contrario puede contribuir en las materias primas del clinker.
- El mezclado de residuos peligrosos para la elaboración de combustible alterno debe de cumplir con las especificaciones solicitadas por el cliente para poder quemarse eficientemente sin afectar el proceso.
- Como respuesta a las actuales exigencias ambientales, las emisiones gaseos y los polvos resultantes del quemado de los combustibles alternos cumplen con la normatividad; estas emisiones son menores que las resultantes en un incinerador.
- Los problemas típicos de incineración tales como la corrosión, disposición de residuos sólidos o líquidos de la depuración desaparecen; no es necesario ningún tipo de disposición posterior.
- Considerando que para la industria generadora de residuos constituye un alto costo la disposición de residuos y que para la industria del cemento los costos de energía constituyen hasta un 50% de sus costos de producción, la propuesta del reuso de residuos peligrosos como una fuente alterna de energía puede ser atractiva para ambas industrias.
- Desde un punto de vista económico, el contar con una disposición alternativa y una fuente de energía contrasta con

el incremento en los costos del manejo y disposición segura de los residuos peligrosos.

- El reuso de residuos peligrosos como combustible alternativo para la industria cementera (con 40% de sustitución), equivale al consumo del 25% de residuos peligrosos generados en nuestro país, lo cual, aunado al 15% de manejo seguro dado por la infraestructura instalada actualmente, daría como resultado contar con el 40% de disposición y manejo seguro de los residuos peligrosos.

Por las conclusiones anteriores se hacen las siguientes recomendaciones:

- Toda empresa generadora de residuos peligrosos tome conciencia de la importancia de una buena caracterización de sus residuos con la finalidad de facilitar su manejo.
- La empresa de manejo y elaboración de combustible alternativo cumpla con las especificaciones requeridas por el cliente con la finalidad de obtener una eficiencia de destrucción y remoción tal que, no cause efectos adversos a la salud y cumpla con la normatividad aplicable vigente.
- La empresa de consumo de combustible alternativo (cementera) realice los análisis necesarios para la verificación de la calidad del combustible alternativo previo a su inyección al horno.
- El horno para la fabricación de cemento en el que se vaya a instalar el equipo de inyección de combustible alternativo cuente con un equipo de monitoreo continuo con el que se pueda reportar cualquier anomalía que pueda afectar al proceso, a la salud humana o al ambiente.

- Las empresas cementeras que aun no cuentan con la implementación de un programa de combustible alterno, se sometan a los protocolos de prueba necesarios para verificar que sus equipos pueden adoptar esta alternativa.
- El personal que esté involucrado en la implementación del programa de combustible alterno, cuente con la capacitación necesaria para realizar sus labores con la mayor seguridad posible.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Anderson Jonathan et. al.
Redacción de Tesis y Trabajos Escolares
Ed. Diana
México
11a. Impresión, Febrero de 1984
- 2) Batstone Roger et al.
The Safe Disposal of Hazardous Waste
A World Bank Technical Paper
Vol I.
Washington, D.C.
- 3) Bogue Robert
The Chemistry of Portland Cement.
New York, Reinhold
2ª edición
1985
- 4) Chadbourne F. John
Cement Kilns
United States
2ª edición
pp. 8.57-8.75.
- 5) Cortinas de Nava Cristina y Gleason V. Sylvia
Residuos peligrosos en el mundo y en México
Secretaría de Desarrollo Social
Instituto Nacional de Ecología
México, 1993.
- 6) Dambrin E.
*Waste Burning and Thermal Destruction of Organic Compounds in
Kilns*
World Cement
December 1992

-
- 7) Dambrine E.
Hazardous waste confirmed as safe kiln fuel
Rock products
September 1993
pp. 30-37.
- 8) Dawson Brian
Emerging technologies for utilizing waste in cement production
World Cement
December 1992
pp. 22-24.
- 9) EPA (Environmental Protection Agency)
Incinerator and Cement Kiln Capacity for Hazardous Waste
Treatment
Hazardous Waste Engineering Research Laboratory
U. S. Department of Commerce
October, 1986
- 10) EPA (Environmental Protection Agency)
Incinerator and Cement Kiln Capacity for Hazardous Waste
Treatment
Proceedings of the Tenth Annual Research Symposium
National Technical Information Service
Kentucky
April 1984
- 11) Freeman Harry M.
Hazardous Waste Minimization
Mc Graw Hill
United States
1990
- 12) Grancher Roy A.
Changing Scene for Cement
Rock Products
April 1991

- 13) Jackman Alan P.
Hazardous Waste Treatment Technologies
Noyes Publications
New Jersey
1991
- 14) Kurt E. Peray
The Rotary Cement Kiln
2ª Edición
New York
1986
- 15) López R. y Reyes Olivia
Introducción a los residuos industriales y su disposición final
Tesis de Licenciatura
Facultad de Química
1991
- 16) Manahan Stanley E.
Fundamental of Environmental Chemistry
Lewis Publisher
Michigan 1993
- 17) Manahan Stanley E.
Hazardous Waste Chemistry, Toxicology & Treatment
Lewis Publisher
Michigan 1990
- 18) Mendoza R. Carlos
Consideraciones básicas para la operación de un horno rotatorio de Cemento Portland
Tesis de Licenciatura
Facultad de Química
1991

-
- 19) Mogens H. Fog & Nādkarni Kishore L.
Energy Efficiency and Fuel Substitution in the Cement Industry with
emphasis on Developing Countries
A World Bank Technical Paper
Vol. 12
Washington, D.C.
- 20) SEDESOL, (Secretaría de Desarrollo Social)
Normas Oficiales Mexicanas en materia de protección ambiental
Diario Oficial de la Federación
22 de Octubre, 1993; 2 de Diciembre, 1994
- 21) Seebach V. Michael & Tompkins Bruce
Metal Emissions are predictable
Rock products.
April 1991
pp. 31-35
- 22) Siemering H. Williams et al.
Experiences with burning waste
Rock products.
April 1991
p.p 36-46
- 23) Tedder D. Williams & F. G. Pohland
Emerging Technologies in Hazardous Waste Management III
American Chemical Society
Washington D.C.
1991