

74
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

"INCINERACION DE SOLVENTES
RESIDUALES"

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA QUIMICA
P R E S E N T A :
EDITH HERNANDEZ CALVA



MEXICO D. F.

1997.

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.

Presidente: Prof. TORRES BARRERA RODOLFO

Vocal: Prof. LUNA PABELLO VÍCTOR MANUEL

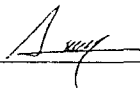
Secretario: Prof. BAEZ PEDRAJO ARMANDO

1er. suplente Prof. CRUZ GÓMEZ MODESTO JAVIER

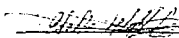
2do. suplente Prof. RAMÍREZ BURGOS LANDY IRENE

Sitio donde se desarrolló el tema: Centro de Ciencias de la
Atmósfera

Asesor del tema: Dr. Armando Baez Pedrajo



Sustentante: Edith Hernández Calva



DEDICATORIAS

A Dios:

Así como existe un cielo, un sol, una luna, una estrella, sé que existe una fuerza más poderosa que el hombre, una fuerza divina que me ha permitido realizar mis propósitos en esta vida y que siempre ha estado conmigo.

Gracias Señor por todo lo que me has dado, todo lo que he logrado es por ti.

A mi madre:

A ti mujer, por todo tu apoyo y esfuerzo que me has brindado, en las buenas y en las malas, por la confianza que has depositado en mí, te admiro por ser una gran mujer que ha salido siempre adelante, te agradezco de corazón todo lo que has hecho por mí, ese trabajo es por ti, espero darte en un futuro próximo lo que tu mereces.

A mi padre:

*Paciencia como la tuya no he visto en otro ser.
Esperanza e ilusión hacia mí siempre me transmitiste, siempre confiaste en mí, gracias papá por toda tu ayuda, te lo agradezco de todo corazón, te quiero mucho.*

A mis hermanos:

Gracias por su ejemplo, el cual me ha motivado a ser alguien en la vida, especialmente a mi hermano Enrique, por la ayuda que me brindó durante la carrera, gracias manito.

También doy gracias a la Universidad por todas las cosas, las gentes, los momentos que en ella encontré.

Mis más sinceros agradecimientos:

EN ESPECIAL AL DR. ARMANDO BÁEZ PEDRAJO

Una gran persona a quien admiro y respeto mucho.

Gracias le doy por su gran apoyo que me brindó, por su confianza que depositó en mí desde el primer día en que lo conocí, su amistad, sus opiniones, la dedicación que le brindó a esta tesis, el tiempo que me dedicó al ayudarme a traducir, la paciencia que tuvo conmigo y por todo lo que usted me ha dado.

Siempre lo recordaré por su bondad y nobleza, no tengo palabras para expresar lo mucho que lo admiro.

Gracias por la amistad y confianza que depositaron en mí a la Sra. Irenita, Mary, Rocío, Evita, al Ing. Raúl Belmont, al Sr. Calisto, al Dr. Hugo Padilla, gracias por sus opiniones.

En pocas palabras le doy gracias al Centro de Ciencias de la atmósfera por sus servicios prestados.

Le doy las gracias al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello así como al Ing. Rodolfo Torres Barrera por su asesoría proporcionada, así como la ayuda que me brindaron para la realización de esta tesis.

A todos mis amigos de la Facultad, que siempre estuvieron conmigo, compartiendo momentos que jamás se olvidarán.

DEDICACIÓN A MI ASESOR :

Dr. Armando Báez P.

La amistad

*Es la más noble
y humilde de los sentimientos.
Crece al amparo del desinterés.
Se nutre dándose
y florece con la comprensión.
Su sitio está junto al amor.
Sólo los honrados pueden tener amigos,
porque la amistad no admite cálculos,
ni siembras, ni dobles.
Exige en cambio :
sacrificio, valor,
comprensión y verdad,
verdad sobre todas las cosas.*

ORACIÓN DEL HOY

Qué rápido pasa la vida, Señor

Pero no me importa lo pasado,

me interesa vivir el "hoy".

Si no te sirvo hoy,

¿cómo podré servirte mañana?

Si no comienzo hoy,

¿cómo podré decir que empezaré mañana?

Si hoy no colaboro contigo,

¿con qué ganas me pedirás algo mañana?

Señor:

Para poder servirte mañana,

hoy te quiero amar.

Para amarte mañana,

hoy te quiero poseer.

Para que en mí te hagas visible

A los hombres de mi cuerpo,

ayúdame, Señor,

a cumplir tu voluntad

en el hoy que vivo.

A una persona muy especial

*Gracias por la ayuda que en algún momento
me has brindado, por tu amistad,
Admiro la sencillez de tu persona
vales mucho
siempre lo diré*

Gracias

José Manuel

Martes 10 de diciembre de 1992

*Llegaste como el viento sin rumbo fijo,
te asentaste a mi lado a disipar tus heridas,
tus triunfos, tus sueños, tus nostalgias.*

*A veces te veía un tornado,
pero siempre desconsolado.*

Te tendí mi mano

Sin afición alguna,

*simplemente realicé la voluntad de mi corazón
y así se dio.*

*Lo más importante es que al ver que tú triunfaste yo también triunfe
ya que el tiempo que estuve contigo,
fue un tiempo de gran provecho.
Salí adelante contigo y sin ti*

Nunca se ovillarán aquellos momentos

*Nada ni nadie es dueño de alguien
todo en esta vida sigue su curso
los momentos pasan sin poder detenerlos
así como bien uno continúa el otro
viven momentos padres pero todos se fueron
por diferentes caminos.
Solo quedan los recuerdos,
pero no es bueno vivir de recuerdos
porque estos ya pasaron,
ya no se puede hacer nada
solo un milagro.*

*Siempre recordaré a aquella azalea que se encuentra allá en el cielo.
Que fue sacrificio de un triunfo reciproco que jamás consolido.*

ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
INTRODUCCIÓN.....	7
OBJETIVOS.....	4
CAPÍTULO 1 DEFINICIONES, GENERALIDADES Y USOS	
INDUSTRIALES DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS	8
1 Residuos peligrosos.....	9
1.1 Definición de residuos peligrosos de acuerdo a la SEMARNAP.....	9
1.2 Generación de un residuo peligroso.....	10
1.3 Residuos que se generan con mayor frecuencia.....	13
1.4 Residuos inorgánicos y orgánicos.....	14
1.5 Sectores industriales que generan residuos peligrosos.....	15
1.6 Número de plantas industriales por localización.....	16
geográfica que generan residuos peligrosos.....	16
1.7 Distribución geográfica de la industria.....	17
1.8 Definición de solvente.....	19
1.9 Solventes de acuerdo a su grupo químico específico.....	20
1.10 Usos de los solventes.....	22
1.11 Solventes más utilizados en la industria.....	24
1.12 Niveles máximos permisibles de los solventes.....	26
CAPÍTULO 2 RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y	
QUÍMICAS DE LOS SOLVENTES RESIDUALES.....	27

2	Propiedades físicas y químicas de los solventes.....	28
2.1	Propiedades físicas.....	28
2.2	Propiedades químicas.....	29
2.3	Aspectos toxicológicos y efectos en la salud.....	33
2.4	Efectos toxicológicos provocados por solventes.....	35
CAPÍTULO 3	INCINERACIÓN.....	37
3	Combustibles que se usan en la industria de proceso.....	38
3.1.1	Líquidos combustibles.....	40
3.1.2	Líquidos parcialmente combustibles.....	43
3.1.3	Combustibles alternos para ser incinerados en hornos de cemento.....	47
3.2	Principios básicos de la incineración.....	52
3.2.1	Etapas de la incineración.....	53
3.2.2	Aspectos técnicos de la incineración.....	54
3.2.3	Diferencia entre combustión e incineración.....	56
3.2.4	Reacciones típicas de la combustión.....	56
3.2.5	Tecnologías aplicables a los sistemas de incineración.....	57
3.3	Lecho fluidizado.....	59
3.4	Horno rotatorio.....	63
3.4.1	Protocolo de pruebas para un horno rotatorio.....	63
3.4.2	Panorama de la tecnología y sus aplicaciones.....	66
3.4.2	Condiciones del proceso.....	66
3.4.3	Criterios de diseño.....	68
3.4.4	Transferencia de calor.....	75
3.4.5	Tipos de instalaciones.....	80
3.5	Subproductos generados por la incineración.....	85
3.6	Ventajas y desventajas en la destrucción térmica.....	88
3.7	Situación actual.....	90
3.8	Estimación de costos.....	92

CAPÍTULO 4	RIESGOS ASOCIADOS A LOS PROCESOS TÉRMICOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS.....	98
4.1	Riesgos potenciales de los procesos para el tratamiento de los residuos.....	99
4.1.1	Riesgos por toxicidad.....	100
4.1.2	Riesgos por fuego y explosión.....	101
4.2	Emisiones de la incineración y tecnologías para la limpieza del gas.....	103
4.2.1	Tecnologías convencionales de limpieza del gas proveniente del incinerador.....	103
4.2.2	Método húmedo.....	104
4.2.3	Método seco.....	104
4.2.4	Sistema semiseco.....	105
CAPÍTULO 5	CONCLUSIONES.....	106
CAPÍTULO 6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

INTRODUCCIÓN:

En México existe una gran variedad de industrias de proceso generadoras de residuos peligrosos, a la fecha no se cuenta con una infraestructura suficiente para dar un manejo adecuado a la diversidad de residuos urbanos e industriales que se generan, por lo cual es de vital importancia estudiar, y analizar las diferentes tecnologías disponibles en el mundo para el control de dichos residuos con el fin de orientar la política ambiental de nuestro país por senderos adecuados a nuestras peculiaridades y real problemática. En este sentido, los procesos térmicos para el tratamiento de los residuos, ocupan un espacio significativo en el mundo, por lo que es necesario valorar sus perspectivas de desarrollo en nuestro país.

Estos procesos térmicos cuentan con varias tecnologías de incineración que se han desarrollado especialmente para residuos con ciertas propiedades, para ello cada incinerador cuenta con un diseño especial dependiendo del tipo de residuo que se va a incinerar.

Existen varias tecnologías de incineración que se aplican para incinerar residuos peligrosos, entre ellas está el horno rotatorio, lechos fluidizados, incinerador de inyección líquida, incinerador de hogar múltiple, oxidación húmeda, hornos de parrillas, entre otras.

Desde el punto de vista de las técnicas de manejo de los residuos industriales peligrosos nos enfocaremos en este trabajo a lo que son los solventes residuales, ya que estos cuentan con cierto tipo de propiedades y características que los catalogan como combustibles.

Desde el punto de vista de las técnicas del manejo de residuos industriales peligrosos (solventes residuales), su destrucción térmica en hornos de cemento tiene una ventaja importante sobre el confinamiento y otras tecnologías de incineración, y ésta es que, se aprovechan las instalaciones ya existentes,

sin la necesidad de invertir grandes capitales como los necesarios para la instalación de un confinamiento o de otra tecnología de incineración.

Esta ventaja cobra mayor importancia en los países como México, el décimo productor de cemento a nivel mundial, con 35 plantas en todo el territorio nacional.

Ya que en México solo se cuenta con dos confinamientos controlados de residuos peligrosos de servicio público que al parecer están por dejar de funcionar, así como dos confinamientos privados, tres incineradores de residuos peligrosos de servicio privado, diecisiete empresas para el reciclaje de solventes usados, tres empresas cementeras para la recuperación de energía alternativa a partir de residuos peligrosos, tres empresas para la formulación de combustibles alternos entre otras.

Los antecedentes en el uso de los combustibles alternos se remontan principalmente a la crisis mundial de energéticos que se presentó a principios de la década de los 70's, la cual exigió buscar combustibles alternos a los derivados del petróleo, el aprovechamiento de calor generado a partir de la incineración de los residuos, alcanzó un mayor desarrollo en aquellos países con escasez de energéticos.

La búsqueda de emplear combustibles alternos a partir de residuos principalmente de tipo industrial, tales como aceites, solventes gastados, algunos sólidos (llantas gastadas), nats de pinturas, desengrasantes entre otros, de los cuales ya se han reportado resultados satisfactorios en varios países de Europa y en los Estados Unidos indicando que la tecnología es limpia y segura que nos permite destruir residuos industriales en este caso solventes residuales sin crear problemas al ambiente.

El uso de combustibles alternos en los hornos de cemento a nivel nacional se ha venido desarrollando en los últimos años.

Las pruebas hasta ahora llevadas a cabo en plantas cementeras nacionales, se han realizado bajo el más estricto control de variables operacionales,

con sistemas de monitoreo continuo de emisiones, que han confirmado que las operaciones bajo estas condiciones, son confiables y seguras, tanto operacionalmente como ambientalmente, con el objeto de no afectar a la atmósfera y poder hacer un mundo mejor.

OBJETIVOS:

Se analizará que tipos de residuos son adecuados para ser usados como combustibles secundarios en un incinerador.

Se estudiarán algunas de las tecnologías de incineración para la destrucción de solventes residuales.

Se hará un estudio de los solventes residuales que se pueden aplicar como combustibles alternos.

Se analizará alguna tecnología de incineración para tratar residuos peligrosos (solventes), en el que serán quemados para su destrucción y además servirán como combustibles auxiliares.

CAPÍTULO 1
*DEFINICIONES, GENERALIDADES Y
USOS INDUSTRIALES DE LOS
RESIDUOS PELIGROSOS*

1 RESIDUOS PELIGROSOS

Se puede decir que un residuo es cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permite usarlo nuevamente en el proceso que lo generó².

Un residuo químico industrial peligroso es un componente proveniente de las actividades productivas; su existencia y las implicaciones para la salud y el ambiente, no fueron tomadas en consideración sino hasta muy recientemente.

Los problemas y los costos que acarrea una disposición final inadecuada son de tal magnitud, que puede decirse que ellos constituyen uno de los desafíos más importantes que enfrenta la sociedad moderna.

1.1 DEFINICIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS DE ACUERDO A LA SEMARNAP

La Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) por medio de la ley del equilibrio ecológico define a los residuo peligroso como "todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosiva, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas infecciosas o irritantes, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente, así como la salud en los seres vivos". Esta definición general es la base de las siglas CRETIB, la cual significa:

Corrosiva, Reactiva, Explosiva, Tóxica, Inflamable, Biológica Infecciosa, definida con mayor detalle en la NORMA-052-ECOLOGICA-1993.

Los residuos se clasifican como peligrosos en dos sentidos;

- a) Por sus propiedades
- b) En base a las cuatro listas de residuos peligrosos establecido por la **SEMARNAP** en coordinación con otras dependencias. Estas listas clasifican 144 residuos peligrosos de acuerdo con⁹:

1. La industria y el proceso
2. Fuentes no puntuales
3. Materia prima para la producción de pinturas
4. Características de lixiviado que sean tóxicas para el ambiente

1.2 GENERACIÓN DE UN RESIDUO PELIGROSO

Dada la diversidad de procesos químicos e industriales que emplean las industrias, las características de los residuos generados van desde los altamente peligrosos hasta los que no representan riesgo. Tradicionalmente la industria ha depositado sin control los residuos en terrenos en forma clandestina y en ocasiones se ha advertido la contaminación de cuerpos de agua, así como la capa vegetal del subsuelo.

La industria nuclear, química y metal-mecánica, así como las actividades hospitalarias constituyen fuentes de contaminantes peligrosos. El aire, el agua y el suelo que entran en contacto con los residuos de estas actividades corren el riesgo de contaminarse. La preocupación de las naciones a este respecto es generalizada, y en nuestro país, se ha establecido una política que pone particular énfasis en los mecanismos de control.

La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) reconoció que en el territorio nacional se producirían durante el año de 1991 aproximadamente 450 000 toneladas diariamente, de las cuales 337 000 toneladas corresponden a las

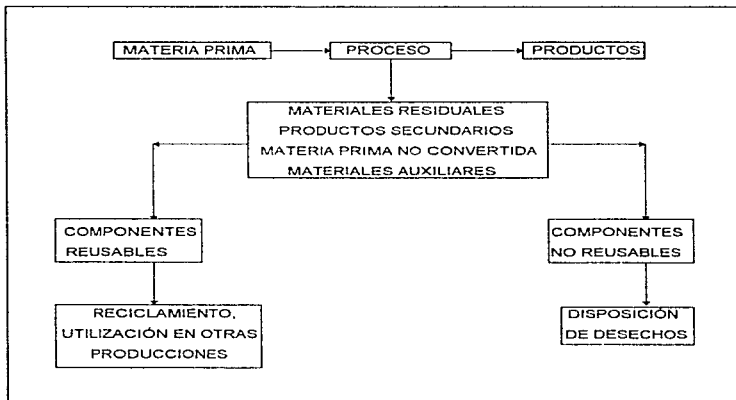
actividades mineras extractivas y de fundición de metales no ferrosos, 81 000 resultan de la industria de procesos de química básica orgánica e inorgánica y

31 000 toneladas son residuos agroindustriales (principalmente de las industrias de azúcar, café y concentradoras de jugo y aceites), lo cual representa 164 250 000 toneladas al año (14 5000 ton/día), corresponden a residuos considerados como peligrosos, la mayoría de los cuales son generados por los procesos de la química básica e inorgánica y petroquímica. En las últimas décadas, se ha incrementado la explotación minera, que genera más del 90% de residuos a nivel nacional, algunos con características peligrosas por el alto contenido de metales pesados, como el selenio, plomo, cadmio, entre otros y como caso especial el arsénico. Los procesos siderúrgicos de fundición de chatarra, generadores de polvo y todos conteniendo metales pesados, están concentrados mayormente en las grandes ciudades como son: La zona metropolitana de la Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey, Veracruz, Puebla, Hidalgo y algunas otras. Los procesos químicos, orgánicos e inorgánicos posiblemente sean los más altamente generadores de residuos peligrosos. Los procesos petroquímicos son altamente generadores de residuos tóxicos e inflamables. Según el inventario de las actividades de refinación y transformación de la industria petrolera y petroquímica primaria, se ha estimado un volumen de 1 710 448 toneladas por año, de residuos industriales generados en centros productivos. Por lo que se refiere a la generación de solventes, sobre todo en procesos químicos y petroquímicos y sin tomar en consideración a la industria petrolera y a las industrias maquiladoras de exportación, en el lavado de microcircuitos, se tiene un inventario de generación de 70 millones de litros por año⁹. La generación de los residuos peligrosos se extiende en lo que es toda el área geográfica de México, lo cual, cada industria por muy cuidadosa que sea tiene a generar residuos que son producto de los procesos de fabricación de la manufactura empleada. A continuación se mencionan los principales generadores de solventes industriales: industria de pintura, adhesivos, aeroespacio, celulosa, limpieza, electrónica, textil,

química, cemento, maquinadora, maquinaria, desengrasante, productos derivados del petróleo, productos de metal etc.

En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques, el cual indica como se genera un residuo peligroso³.

Figura 1. Generación de un residuo peligroso



En este diagrama se observa, de manera simple, como es generado un residuo peligroso en un proceso. Partiendo de ciertas materias primas, se genera un producto y como consecuencia materiales reusables y no reusables y como consecuencia un residuo peligroso.

En un posterior capítulo se analizará que equipo de tratamiento térmico es el más adecuado para utilizar este tipo de solventes que no son recuperables, y que no cumplen con ciertos costos para ser reciclados.

1.3 RESIDUOS QUE SE GENERAN CON MAYOR FRECUENCIA

En nuestro país existen gran número de industrias, de las cuales, la mayoría de ellas llegan a utilizar sustancias que al participar en los diferentes procesos generan residuos peligrosos.

A continuación hacemos mención de algunos de los residuos peligrosos generados más comúnmente en la industria³², ver tabla 1 y tabla 2:

Tabla 1. Residuos más comunes en la industria

Lodos corrosivos
Lodos con solventes o solventes gastados
Aceites lubricantes gastados
Aceites solubles, emulsionados, de corte
Asbesto
Residuos con plaguicidas, insecticidas y herbicidas

En la tabla 2. Residuos peligrosos que se generan con mayor frecuencia¹⁸:

RESIDUOS	PORCENTAJE
SOLVENTES	36
ACEITES Y GRASAS	13
PINTURAS Y BARNICES	8
SOLDADURAS DE Pb-Sn	6
ACIDOS Y BASES	3
DERIVADOS DEL PÉTRÓLEO	2
RESINAS	2
OTROS	20

FUENTE: Dirección General de Movimiento Ambiental, INE. 1994

1.4 RESIDUOS INORGÁNICOS Y ORGÁNICOS

RESIDUOS INORGÁNICOS:

Los compuestos inorgánicos incluyen: metales, sales y óxidos de carbono (CO, CO₂). Estos compuestos no entran en combustión en incineradores, no obstante los incineradores pueden generar compuestos inorgánicos. En la tabla 3a se muestran algunos de esos compuestos.

Tabla 3a. Compuestos inorgánicos

Ácidos y Alcalis
Residuos de cianuro
Soluciones y lodos que contienen metales pesados
Residuos de asbesto
Residuos aceitosos

RESIDUOS ORGÁNICOS:

Son compuestos que contienen carbono, hidrógeno y frecuentemente oxígeno. Estos compuestos son combustibles y pueden por lo tanto ser destruidos en un incinerador.

Tabla 3b. Compuestos orgánicos

Solventes no halogenados
Residuos de policloruros de fenilo
Residuos de resinas y pinturas
Residuos de productos químicos orgánicos
Residuos orgánicos putrescibles

1.5 SECTORES INDUSTRIALES QUE GENERAN RESIDUOS PELIGROSOS.

De acuerdo con el XII Censo industrial realizado en 1989 por el Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática (INEGI), la industria extractiva, manufacturera, eléctrica y de la construcción, en la que también se incluye la industria química, está conformada por un número reducido de grandes empresas transnacionales y conglomerados de industrias nacionales, ver tabla 4.

Tabla 4. Sectores por unidad industrial que generan residuos peligrosos

SECTORES	UNIDADES INDUSTRIALES
Minería y extracción del petróleo	2402
Carbón	46
Petróleo y gas natural	33
Extracción de minerales metálicos	678
Explotación de minerales no metálicos	1645
Industrias manufactureras	141446
Productos alimenticios, bebidas y tabacos	51151
Textiles, prendas de vestir y productos de acero	16853
Industrias y productos de papel, imprentas	7952
Sustancias químicas, derivados del petróleo, del hule y del plástico.	5472
Productos minerales no metálicos	14502
Industria metálica básica	932
Productos metálicos, maquinaria y equipos	26945
Otras industrias manufactureras	1498
Industria eléctrica	36
Industria de la construcción	5308

FUENTE: XIII Censo Industrial, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática 1992.

1.6 NÚMERO DE PLANTAS INDUSTRIALES POR LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

En la tabla 5, se presenta la localización de las plantas de la industria química afiliada a la ANIQ (Asociación Nacional de la Industria Química).

Tabla 5. Número de plantas industriales por entidad federativa

Entidad Federativa	Número De Plantas	Generación de R. P. (Miles de ton / año)	% de generación
Estado de México	126	1415	17.68
Veracruz	81	475	5.7
D.F.	74	189	22.98
Nuevo León	31	800	10.00
Tamaulipas	24	150	1.87
Guanajuato	23	260	3.25
Jalisco	21	600	7.50
Puebla	20	245	3.06
Chihuahua		210	2.62
Durango,		80	1.00
Coahuila,	17	300	3.75
Baja California		160	2.00
Morelos	12	110	1.37
Querétaro.		300	3.75
S. P.		160	2.25
Michoacán	14	120	1.50
Chiapas		60	0.75
Oaxaca		70	0.87
Tabasco	9	50	0.63
Hidalgo	8	135	1.68
Tlaxcala	8	60	0.75
Zacatecas		20	0.25

Información: Instituto nacional de ecología (INE), 1994

1.7 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA INDUSTRIA

El tipo de desarrollo económico que tuvo lugar en el país, dio lugar a la concentración industrial en unos cuantos polos y trajo consigo un crecimiento urbano acelerado y, frecuentemente, desordenado. Esto es lo que ha ocurrido en las zonas metropolitanas de la ciudad de México, Guadalajara, Jalisco y Monterrey Nuevo León⁹.

En menor grado, en el estado de Veracruz se han desarrollado zonas industriales en las que predomina la industria petrolera: extracción refinación y producción petroquímica. En tanto que en la región de la frontera norte, conformada por las entidades de Baja California, Chihuahua, Coahuila, Sonora y Tamaulipas, han proliferado las industrias denominadas maquiladoras, instaladas con capital extranjero, con el propósito de generar productos de exportación, de éstas se calcula que existen alrededor de 1408 caracterizadas por generar residuos peligrosos, ver tabla 6.

Tabla 6. Distribución geográfica de la industria por distribución geográfica

ENTIDAD FEDERATIVA	PORCENTAJE	INDUSTRIAS PRINCIPALES
Aguascalientes	0.4	Textil, Automotriz, Computación, Química
Baja California	1.8	Alimentos, Prod. Metálica, Maquinaria, Maquina
B.C. Sur	0.1	Alimentos, Electrónica, Textil
Campeche	0.2	Pesquera, Alimentación y bebidas
Chiapas	1.3	Alimentos
Chihuahua	1.9	Muebles, y Productos de Madera, Papel y Metal
Coahuila	3.1	Hierro, Acero, Automotriz, Maquinadora
Colima	0.2	Alimentos
D.F.	29.5	De todo tipo

Continuación de la tabla 13

ENTIDAD FEDERATIVA	PORCENTAJE	INDUSTRIAS PRINCIPALES
Durango	0.9	Prod. de madera, Papel, Metal, Textil, Alimentación
Guanajuato	2.4	Automotriz, Textil, Química, Alimentos, Calzado
Guerrero	0.4	Alimentos, Metales Preciosos
Hidalgo	2.2	Alimentos, Cemento, Petroquímica, Auto transportes
Jalisco	6.7	Petroquímica, Electrónica, Papel, Textil, Calzado
Michoacán	1.3	Alimentos, Papel, Hierro, Acero, Química
Morelos	1.1	Alimentos, Química, Productos de Metal, Auto transport
Nayarit	0.5	Alimentos, Tabaco, Muebles, Textil, Calzado, Metal
Nuevo León	9.1	Acero, Química, Papel, Vidrio, Alimentos Cementos, Productos derivados del Petróleo, Maquinadora.
Oaxaca	1.0	Alimentos, Papel, Textil, Cemento, Prod. deriv. petróleo
Puebla	3.8	Textil, Automotriz, Maquinadora, Equipo, Papel, Petroquímica, Alimentos.
Querétaro	1.4	Alimentos, Electrónica, Papel, química, Textil
Quintana Roo	0.1	Alimentos y Muebles
S.L.P.	1.4	Fundición, Productos de Metal, Textil, Alimentos
Sinaloa	1.0	Alimentos, Papel, Productos de Metal
Sonora	1.3	Cemento, Automotriz, Alimento, Maquillado
Tabasco	0.6	Productos derivados del petróleo, Alimentos,
Tamaulipas	1.8	Madera, Maquinadora, Productos derivados del Petróleo
Tlaxcala	0.5	Alimentos, Papel y Química
Veracruz	5.3	Prod. deriv. del Petróleo, Química, Textil, Alimentos, Papel, Productos de Metal, Maquinaria, vidrio, cemento
Yucatán	0.8	Productos de Helequen, Textil, Alimentos, Muebles, Maquinadora
Zacatecas	0.1	Alimentos, Química, Productos de Metal

1.8 DEFINICIÓN DE SOLVENTE

Los solventes son líquidos que facilitan la disolución de otras sustancias para diferentes fines como son:

El proceso de purificación de un producto y la disolución de grasas. Al utilizar un solvente se facilita el manejo y se mejora el comportamiento para ciertos procesos de las sustancias o compuestos disueltos en él; de esta forma se alcanzan niveles de transformación más altos en las reacciones, así como eficiencias mayores.

A continuación en otros términos definiremos lo que es un Solvente Residual:

Un solvente es un agente líquido usado en la manufactura, purificación o limpieza de un producto. Los solventes limpian partes o la totalidad de los productos durante la operación del proceso.

Otra definición es la siguiente:

Los solventes son líquidos que disuelven a otras sustancias (soluto), generalmente un sólido, sin ningún cambio en la composición química formando así una solución⁹.

La proporción de la sustancia que se encuentra en una solución depende de la solubilidad de estas y que en parte depende de la temperatura y la presión.

Los solventes orgánicos son clasificados en grupos que se basan de acuerdo a su composición química, ver tabla 7.

1.9 SOLVENTES DE ACUERDO A SU GRUPO QUÍMICO ESPECÍFICO

A continuación se hace mención de los grupos de solventes más empleados en la industria¹²:

Tabla 7. Grupos de solventes

CETONAS
ALCOHÓLES
AMINAS
CLORADOS HALOGENADOS
ÉTERES
HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS
NITRADOS, ETC.

En las tablas 8 y 9 se muestran los solventes que constituyen a cada grupo específico.

Tabla 8.

CETONAS	ALCOHOLES	HIDROCARBUROS AROMÁTICOS
Acetona	Metanol	Benceno
Acetofenona	Etanol	Tolueno
Ciclo hexanona	Propanol	O. Xileno
Di iso butil cetona	Butanol	P. Xileno
Metil butil cetona	Etilenglicol	M. Xileno
Metil etil cetona	Alcohol amilico	
Metil butil cetona		
Metil isobutil cetona		
Metil propil cetona		

Tabla 9.

HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS	ÉTERES	CLORADOS
Nafta	Éter	Clorobenceno
Trementina	Éter isopropilico	Cloroformo
Querosina	Etilenglicol mono butil éter	Cloruro de etilo
Pentano	Dimetil éter	Dicloruro de etileno
Ciclo hexano	Etilenglicol mono etil éter	Penta cloro etano
Hexano		
Etano		

1.10 USOS DE LOS SOLVENTES

Los solventes orgánicos industriales tienen una amplia variedad de usos en los procesos químicos industriales⁷ en donde son usados en grandes cantidades, en cambio en los laboratorios se usan en cantidades variables, y en el hogar se llegan a usar en cantidades pequeñas, empleándose de esta manera en un amplio campo.

En la tabla 10 a 12 se dan los diversos usos de solventes de acuerdo al grupo químico específico.

Tabla 10. Usos de los solventes de acuerdo a su grupo químico específico⁷

ACETONAS	ALCOHOLES	ETERES	CLORADOS
Disolventes	Disolventes	Disolventes	Disolventes
Tintes	Textiles	Anestésicos	En limpieza
Barnices y lacas	Barnices	Lacas	Refrigerante
Cemento	Colas	Plásticos	Lacas
Celuloide	Tintas	Fusibles	Tintes
Gomas	Pinturas	Síntesis orgánica	Plásticos
Plásticos	Resinas	Prod. farmacéutico	Barnices
Eliminadores de barnices	Limpieza de metales	Combustible de motores	Perfumes
Eliminadores de pinturas	Limpieza en seco	Combustible de aviación	Eliminadores de pinturas
Síntesis orgánica	Adhesivos		Síntesis orgánica
Prod. farmacéutico	Plásticos		Prod. farmacéutico
Lubricantes	Perfumes		Extintor de incendio

Tabla 11. Usos de los solventes de acuerdo a su grupo químico específico

HIDROCARBUROS ALIFATICOS	AMINAS	NITRADOS
Disolventes	Disolventes	Disolventes
Desengrasantes	Gomas	Limpieza en seco
Fluidizantes de pinturas	Textiles	Eliminadores de pinturas
Gomas	Síntesis orgánica	Revestimiento de resinas vinílicas
Perfumes		Síntesis química

Tabla 12. Usos de diferentes solventes

ESTIROL
Disolvente, Gomas, Plásticos, Síntesis química
TREMENTINA
Disolvente, Espesor de pinturas, Barnices, Pulidores, Impresión
QUEROSINA
Disolvente, Iluminación, Limpieza, Combustibles, Calefacción
PIRIDINA
Disolvente, Productos farmacéuticos, Desinfectantes, Síntesis química, Pinturas, tintes
MORFOLINA
Disolvente, Barnices, Revestimientos para papel, etc.

1.11 SOLVENTES MÁS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA

En la industria, los solventes tienen un papel muy importante ya que de ellos depende la elaboración de muchos productos, que son utilizados en un sin número de procesos de manufactura que son llevadas a cabo en gran número de industrias. Estos solventes son clasificados en grupos por sus características químicas ya que de esta manera son mejor clasificados e identificados, ver tabla 13.

Tabla 13. Nombres más comunes en la industria química

FORMULA QUIMICA	GRUPO	SINONIMOS
C_3H_6O	ACETONA	Dimetilcetona, B-Cetopropano, Propanona - 2, Eter piroacetico
$C_6H_{12}O$	MÉTIL BUTIL CETONA	Butilmetilcetona, 2 Hexanona, Propilacetona
$C_6H_6COCH_3$	ACETOFENONA	Acetobenceno, Hipnona, Fenilmetilcetona
$CH_2[(CH_2CH_2)_2]CO$	CÍCLOHEXANONA	Cetohexametileno, Cetona pimelica
C_4H_8O	MÉTIL ETIL CETONA	MEK, 2-Butanona
$C_4H_8COC_2H_5$	MÉTIL ISO BUTIL CETONA	Hexanona, 4 Metil 2-Pentanona
$C_5H_{10}O$	MÉTIL PROPIL CETONA	MPK, Etilacetona, 2-Pentanona
CH_3OH	ALCOHOL MÉTILICO	Metanol, Alcohol de Madera
$CH_3CH_2CH_2OH$	ALCOHOL PROPILICO	Etil Carbinol, Propanol-1
CH_3CH_2OH	ALCOHOL ETILICO	Etanol
$(CH_2OH)_2$	ÉTILENGLICOL	1,2-Etanodiol, Etilenálcohol, Glicol, Alcohol Glicol
$C_4H_{10}O$	ALCOHOL BUTILICO	1,2-Butanol, Alcohol Butínico, Metiletilcarbinol
$C_5H_{12}O$	ALCOHOL AMILICO	Ocho Isómero: Alcoholes Primarios, Secundarios y Terciarios, 1-,2-,3-Pentanol, Aceite Fusel

Continuación de la tabla 13

FORMULA QUÍMICA	GRUPO	SINÓNIMOS
$\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$	TOLUENO	Metil Benceno, Fenil Metano, Tolvol
$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	XILENO	Tres isómeros Orto, Para, Meta, Dimetil Benceno
C_6H_6	BENCENO	Benzol, Nafta del Alquitrán de Hulla
C_5H_{12}	QUEROSINA	Queroseno, Fuel-Oil No. 1, Petróleo de quemar
$\text{CH}_2[(\text{CH}_2\text{CH}_2)_2]\text{CH}_2$	PENTANO	Hidruro de Amilo
$(\text{CH}_6)_6$	CICLO HEXENO	1,2,3,4, Tetra Hidro Benceno
$(\text{CH}_3\text{CH}_2)_2\text{O}$	CICLO HEXANO	Hexa Hidro Benceno(-201), Hexametileno, Hexanafteno
$(\text{CH}_3\text{CH}_2)_2\text{O}$	ÉTER	Éter de anestesia, Dietil Éter, Oxido de Dietilo, Etil Éter, Oxido de Etilo
$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	ÉTER ISO PROPILICO	Éter de Disopropilo, 2-Isopropoxipropano
$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OC}_4\text{H}_9$	ÉTILENGLICOL MONO BUTIL ÉTER	2-Buto xietanol, n-Butil β-Hidro Hexil Éter, Butil Cellosolve
$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OC}_2\text{H}_5$	ÉTILENGLICOL MONO ETIL ÉTER	Componente del Cellosolve, 2-Etoxi-etanol
$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	CLÓROBENCENO	Mono Cloruro de Benceno, Cloro Benzol, Monocloro Benceno, Cloruro de Fenilo
CCl_4	TETRA CLORURO DE CARBONO	Tetracloro Metano
CHCl_3	CLÓROFORMO	Tricloro Metano
CH_3Cl	CLORURO DE METILO	Clorometano, Monocloro Metano
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Cl}$	CLORURO DE ÉTILO	Cloro Etano, Éter Hidro Cloro rico, Mono Cloro Etano,
C_5H_5	PIRIDINA	
$\text{C}_4\text{H}_9\text{NO}$	MORFOLINA	Imidoxidil Dietilo, Oximida de Dietileno, Tetrahidra-1,4,Oximida de Dietileno
$\text{C}_5\text{H}_4\text{O}_2$	FURFUROL	Acete de Horniga Artificial, Fural, 2-Furaldehido, 2-Furancarbal, Furoil, Aldehido piromúxico

1.12 NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES

Los solventes mencionados anteriormente se distinguen por sus propiedades físicas y químicas, cada uno de ellos se caracteriza por su grado de toxicidad, que provocan efectos a la salud en función del grado de exposición del trabajador, de esta manera se han realizado pruebas para tratar de obtener el nivel máximo permisible de exposición en el ambiente de trabajo, para jornadas de 8 horas, ver tabla 14.

Tabla 14. Niveles máximos permisibles de algunos solventes⁹

SOLVENTE	NIVEL MÁXIMO PERMISIBLE	SOLVENTE	NIVEL MÁXIMO PERMISIBLE
Acetona	1000 ppm en el aire	Tolueno	200 ppm en el aire
Metil Butil Cetona	100 ppm en el aire	Xileno	200 ppm en el aire
Acetofenona	20 ppm en el aire	Tronmentina	100 ppm en el aire
Di Iso Butil Cetona	50 ppm en el aire	Querosina	No hay nada estab.
Metil Etil Cetona	250 ppm en el aire	Pentano	1000 ppm en el aire
Metil Iso Butil Cetona	100 ppm en el aire	Ciclo Hexano	400 ppm en el aire
Metil Propil Cetona	200 ppm en el aire	Benceno	25 ppm en el aire
Ciclo Hexanona	50 ppm en el aire	Ciclo Hexeno	400 ppm en el aire
Alcohol Metílico	200 ppm en el aire	Octano	500 ppm en el aire
Alcohol Etilico	1000 ppm en el aire	Cloro Benceno	75 ppm en el aire
Alcohol Propílico	400 ppm en el aire	Cloruro de Etilo	1000 ppm en el aire
Alcohol Butílico	500 ppm en el aire	Di Cloruro de Etilo	1000 ppm en el aire
Etilenglicol	No hay nada estab.	Penta Cloro Etano	5 ppm en el aire
Alcohol Amílico	100 ppm en el aire	Tetra Cloruro de Carbono	10 ppm en el aire
Ciclo Hexanol	50 ppm en el aire	Nitro Benceno	1 ppm en el aire
Metil Ciclo Hexanol	100 ppm en el aire	Nitro Metano	100 ppm en el aire
Etilenglicol Mono	25 ppm en el aire	Nitro Etano	100 ppm en el aire
Metil Éter			
Éter Iso Propílico	400 ppm en el aire	1-Nitro Propano	25 ppm en el aire
Etilenglicol Mono	50 ppm en el aire	Estirol	100 ppm en el aire
Butil Éter			
Éter	400 ppm en el aire	Piridina	5 ppm en el aire
Dimetil Éter	No hay nada estab.	Furfurol	5 ppm en el aire
Etilenglicol Mono Etil	25 ppm en el aire	Morfolina	20 ppm en el aire

CAPÍTULO 2
*RESUMEN DE LAS PROPIEDADES
FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS
SOLVENTES RESIDUALES*

2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SOLVENTES

Los materiales y sustancias que constituyen los residuos peligrosos están caracterizados de acuerdo con sus propiedades físico y químicas. A continuación se mencionan algunas de las propiedades de los solventes que se tratarán en esta tesis.

2.1 PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades físicas comprenden aquellas que pueden ser determinadas sin alterar la composición química de la materia, son típicas de cada sustancia o compuesto, y aunque muchas son comunes para varias sustancias, no todas son las mismas para dos compuestos diferentes.

Algunas de estas propiedades son:

Estado: líquido, sólido o gaseoso.

color: El color de un cuerpo iluminado depende de su constitución molecular que determina su capacidad para reflejar distintas longitudes de onda luminosas y de la clase de luz, ya sea monocromática o policromática empleada para iluminarlo.

Sabor: Efecto que se produce en el paladar de ciertas cosas.

Densidad o peso específico: Se refiere a la masa o peso del volumen dado de una sustancia, comparada con la masa o peso de un volumen igual de agua.

Solubilidad: en agua, esta propiedad se expresa como la cantidad o el porcentaje de un material (peso) que se disuelve en agua a temperatura ambiente. El peso de sustancia disuelta que satura 100 g de disolvente.

Coefficiente de partición lípido-agua: Es la relación entre la solubilidad en agua de un material y su solubilidad en un aceite.

Presión de vapor: Mide indirectamente la presión de una sustancia que se vaporiza a una temperatura dada. A mayor presión de vapor la sustancia desprende una mayor cantidad de vapores a esa temperatura, la cual generalmente corresponde a la temperatura ambiental.

Temperatura de ebullición: Es la temperatura a la cual la presión de vapor de un líquido es igual a la presión externa.

Temperatura de solidificación: Es la temperatura a la cual las fases sólidas y líquidas están en equilibrio.

2.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

Son aquellas que pueden ser determinadas cuando la sustancia sufre cambios en su composición básica, y las que al manifestarse, en general se acompañan de cambios en una o varias de sus propiedades físicas.

Corrosividad: Un residuo se considera peligroso por su corrosividad si este presenta las siguientes características:

En una solución acuosa presenta un pH menor o igual a 2, o mayor o igual a 12.5

En estado líquido es capaz de corroer el acero al carbón, a una velocidad

de 6,35 milímetros por año y una temperatura de 55° C.

Muchos vapores son más pesados que el aire.

Los vapores pueden viajar a una fuente de ignición y retroceder con llamas.

Reactividad: Un residuo se considera peligroso por su reactividad si este llega a presentar las siguientes características:

Bajo condiciones de golpe, presión, temperatura o espontáneamente se descompone, combina o polimeriza vigorosamente.

Es normalmente inestable y se combina o transforma violentamente sin detonación.

Reacciona con el agua y forma mezclas potencialmente explosivas o genera gases, vapores o humos en cantidades suficientes para provocar desequilibrio ecológico o daños al ambiente.

Los contenedores pueden explotar cuando se calientan.

Algunos vapores pueden formar mezclas explosivas con el aire.

Flamabilidad: Un residuo se considera peligroso si por su flamabilidad presenta las siguientes características:

En solución acuosa contiene más del 24% de alcohol en volumen.

Es líquido y tiene un punto de inflamación inferior a 60° C.

No es líquido, pero es capaz de causar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos.

Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes.

Temperatura de ignición: Es la temperatura más baja en la cual un material emite vapores flamables en cantidad suficiente para incendiarse en presencia del aire, en cualquier fuente de ignición.

La más baja temperatura a la que se inicia y continúa la combustión de una sustancia cuando se calienta al aire.

Temperatura de autoignición: Es la temperatura. más baja en la cual un material flamable, al mezclarse con aire se incendia por sí sólo sin la presencia de una flama o chispa.

Capacidad oxidante o comburente: se define así a la capacidad de liberar oxígeno para auxiliar en la combustión de materiales orgánicos y en la descomposición o degradación de materiales inorgánicos.

Explosividad: Un residuo se considera peligroso por su explosividad si presenta las siguientes características:
Es más sensible a golpes o fricción que el dinitrobenceno.
Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y una atmósfera de presión.

Limites de explosividad en el aire: Los limites de explosividad son dos: el límite bajo [Lower Explosive Level (LEL)] y el superior [Uper Explosive Level (UEL)].
El primero se refiere a la concentración mínima de vapores de una sustancia, mismos que pueden explotar si se calientan. Se expresa como porcentaje de vapor en el aire. El segundo se refiere a la concentración más alta de vapores de una sustancia, los cuales en presencia de calor explotarán, se expresa como porcentaje de vapor en el aire.

TABLA 15. DE ALGUNAS DE LAS PROPIEDADES DE LOS SOLVENTES

Solvente	PM	P Ebu.	P Fusión	P. Fla	V. Cal	Q Esp	λ Vap	λ difu	ρ crítico	P. Vap	Viscos	Fórm Química
Acetona	58.08	56.2	-94.3	-16	7373	576	129.9	23.4	268	229	316	CH ₃ COCH ₃
Acetofenona	120	202	16.7	1.05		434	77				1.8	C ₆ H ₅ COCH ₃
Benceno	78.11	80.1	5.5	-11	9660	4107	64.9	30.1	304	100	60	C ₆ H ₆
Butanol	74.12	117.75	-99.8	35	8276	589	143.9	29.9		6.44	2.49	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ OH
Tetra cloruro de c.	153.84	76.75	-22.6			200	40.5	4.2	858	114	68	CCl ₄
Diál éter	74.12	34.6	-116.3	-41	8827	530	61.04	23	203	250	223	CH ₃ OC ₂ H ₅
Etanol	46.01	76.92	-119.5	16	7020	586	204.3	24.9	276	1.15	1.1	C ₂ H ₅ OH
Etilen monoetil éter	80.12	135.1		57		555				3.6	2.65	C ₂ H ₅ OCH ₂ CH ₂ OH
Heptano	100.2	98.4	-99.6	-5	11375		75		234	40		CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃
Hexano	86.17	69.7	-94.3	-9.8	10630	531	82		23	250		CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃
Metanol	32.04	64.8	-97.8	15.6	6334	567	202.8	29.5	272	200	55	CH ₃ OH
Metil butil cetona	100.6	127.5	-54.4	23		583	83				584	CH ₃ (CH ₂) ₃ COCH ₃
Metilciclo hexanol	114.18	165	-9.2	63		6076	448	100	247	100	417	CH ₂ (CH ₂) ₅ OH
Metil etil cetona	72.10	79.57	-55.9	-5.6	8976	448	100	247	100	417		CH ₃ COCH ₂ CH ₃
Octanol	129.22	195.2	-15.4	1.95		533				1		CH ₃ (CH ₂) ₇ CH ₂ OH
Propanol	97.19	-122	15		6009	566	163		273	20	1.91	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH
Tolueno	92.13	110.6	-95	4	10100	362	65		252	40	552	C ₆ H ₅ CH ₃
Xileno	106.16	144.4	-25.17	29		4				45.1	95	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂
Diál éter	74	34.6	-117	7			64					C ₂ H ₄ OC ₂ H ₅
Metil Propil Acetona	66.08	103.3	-77.8				59					CH ₃ COCH ₂ CH ₂ CH ₃

p Ebu = °C

P. Fusión = °C

P. flash = °C

V. Cal. = Cal./g

Q. Especifico = Cal/g

λ Vap. = Cal/g

λ difusión = Cal/g

ρ Densidad = g/cm³

2.3 ASPECTOS TOXICOLÓGICOS Y EFECTOS EN LA SALUD

La intoxicación se produce por lo general por dos vías de introducción en el cuerpo humano: las vías respiratorias y la piel. Los solventes orgánicos en general, crean rápidamente en los lugares donde se manipulan atmósferas ricas en dichos compuestos, en los que forzosamente ha de respirar continuamente un obrero.

Igualmente, cuando las manos del trabajador manipulan estos líquidos, existe la posibilidad de intoxicación por vía cutánea. De ahí la importancia que tiene la seguridad en la manipulación de los solventes.

La toxicidad de los solventes depende estrechamente de su constitución química. En general, los alcoholes y las cetonas suelen ser mucho menos tóxicos que los derivados halogenados o los hidrocarburos aromáticos.

Desde el punto de vista cuantitativo, hay que distinguir dos tipos de intoxicación: la aguda y la crónica. Los síntomas de ambas son en general muy diferentes, y aunque parezca paradójico, suele ser mucho más difícil de combatir la última⁷

a) Etapas de interacción de los residuos peligrosos con el organismo humano.

Exposición: se considera que un individuo está expuesto cuando el residuo peligroso se encuentra en la vecindad inmediata de las vías de ingreso al organismo: respiratoria (inhalación); tegumentaria (absorción a través de la piel y las mucosas) y gastrointestinal (ingestión).

Absorción: consiste en el paso del residuo peligroso, a través de las membranas biológicas correspondientes, a la circulación sistemática. En la sangre las sustancias que lo componen se solubilizan en el plasma y/o se unen a las proteínas plasmáticas o a los glóbulos rojos.

Distribución: corresponde a la fase en la cual un residuo peligroso o las sustancias que lo componen son distribuidos por la sangre a los tejidos corporales para luego ser metabolizados, retenidos o excretados.

Eliminación: ocurre ya sea por excreción urinaria y/o intestinal y por biotransformación (sinónimo de metabolismo). En términos globales, el metabolismo tiende a generar sustancias menos activas y fácilmente excretables.

Acumulación: de acuerdo con las características físico y químicas del residuo peligroso, o de las sustancias que lo componen, pueden llegar a fijarse en ciertos tejidos y acumularse en ellos e interactuar con las macromoléculas celulares.

b) Determinación de la exposición

La evaluación de la exposición corresponde a la estimulación- cualitativa o cuantitativa- de la dosis (cantidad de sustancia que ingresa al organismo), frecuencia, duración y ruta a través de la cual se produce la exposición.

2.4 EFECTOS TOXICOLÓGICOS PROVOCADOS POR SOLVENTES

En la tabla 16 se muestran en general los efectos (patología, signos y síntomas), causados por los diferentes tipos de adsorción de solventes⁷.

Tabla 16. Claves designadas para identificar los efectos toxicológicos provocados por solventes

ABSORCIÓN	CLAVE	PATOLOGÍA	CLAVE	SIGNOS Y SÍNTOMAS	CLAVE
Inhalación	1A	Irritante	1P	Dolor de cabeza	1SS
Percutáneo	2A	Depresivo del S.N Central	2P	Dermatitis	2SS
Ingestión	3A	Cinusitis Hemorragia	3P	Narcosis	3SS
		Tumores en la vejiga	4P	Faringitis y bronquitis	4SS
		Trastornos hepáticos	5P	Desvanecimiento	5SS
		Lesión de hígado	6P	Gastritis con nauseas y vomito	6SS
		Asfisiaste	7P	Conjuntivitis	7SS
		Nefritis	8P	Irritación de la piel	8SS
		Edema pulmonar	9P	Irritación de ojos	9SS
		Lesión de los tubos renales	10P	Nauseas	10SS
		Gastritis hemorrágica	11P	Vértigo	11SS
		Alergeno	12P	Fatiga y debilidad	12SS
		Edema cerebral	13P	Debilidad	13SS
		Neurosis óptica y atrofia	14P	Convulsiones	14SS
		Neuminitis hemorrágica	15P	Vomito	15SS
		Dolor de cabeza	16P	Excitación del sistema nervioso central.	16SS
		Necrosis central del hígado	17P	Coma	17SS
		Lesión a los riñones	18P		

No. A = Número Absorción. Ejemplo 1A = Inhalación	No. P = Número Patología Ejemplo 1P = Irritante	No SS = Signos y Síntomas Ejemplo 1SS = Dolor de cabeza
---	---	---

La tabla 17 nos muestra los efectos tóxicos causados por la exposición de algunos solventes que son usados en la industria de proceso.

ESTADO FÍSICO DE ALGUNOS SOLVENTES, ASÍ COMO SUS EFECTOS A LA SALUD.

Tabla 17. Efectos causados por algunos solventes en la salud

SOLVENTE	CARACTERÍSTICAS	ABSORCIÓN	PAATOLOGÍA	SIGNOS Y SINTOMAS
Acetona	Liq. Volátil, olor fuerte	1A, 3A	1P, 2P	7SS, 1SS, 5SS, 6SS, 3SS
Metil etil cetona	Liq. Incoloro Olor a acetona	1A	1P, 2P	9SS, 1SS, 11SS, 10SS, 2SS
Acetofenona	Liq. Olor penetrante	1A	1P, 2P	2SS, 3SS
Ciclohexanona	Liq. Aceitoso, olor aromático	1A	1P, 2P	7SS, 8SS, 3SS
Di iso butil cetona	Líquido incoloro	1A, 3A	1P, 2P	9SS, 1SS, 11SS, 10SS, 15SS,
Metil butil cetona		1A	1P, 2P	9SS, 3SS
Metil isobutil cetona	Líquido incoloro	1A	1P	9SS
Metil propil cetona	Líquido incoloro, olor agradable	1A	1P, 2P	9SS, 3SS
Alcohol metálico	Liq. ligero, incoloro, inflamable	1A, 2A, 3A	2P, 13P, 14P, 17P,	7SS, 1SS, 11SS, 15SS, 10SS, 13SS, 3SS, 14SS
Alcohol propílico	Liq. incoloro, olor pesado	1A, 3A	1P, 2P	7SS, 8SS, 1SS, 10SS, 11SS, 15SS,
Etilenglicol	Liq. incoloro, higroscópico	1A, 2A	2P, 10P, 6P	1S, 10SS, 15SS, 13SS
Alcohol amílico	Liq. incoloro, olor aromático	1A	2P	1SS, 11S, 10SS, 15SS, 7SS
Etilenglicol mono butil éter	Liq. incoloro,	1A, 2A	1P, 13P	9SS, 1SS, 9SS
Dietilenglicol	Liq. incoloro, higroscópico	1A	2P	15SS, 10SS, 17SS
Benceno	Liq. inflamable, incoloro	1A, 2A, 3A	2P, 17P	1SS, 3SS, 15SS, 8SS, 16SS
Tolueno	Liq. inflamable, incoloro	1A	1P, 2P, 6P	2SS, 8SS, 15SS, 12SS, 12SS, 1SS, 3SS
Xileno	Liq. inflamable, ligero, incoloro	1A, 2A	1P, 2P, 6P	17SS, 1SS, 11S, 3SS
Trementina	Masa resinosa destilada	1A, 2A, 3A	1P, 2P	7SS, 16SS, 11SS, 10SS
Querosina	Liq. incoloro, destilado del petró.	1A, 3A	1P, 2P	1SS, 16SS, 11SS, 10SS
Pentano	Liq. incoloro, inflamable	1A	1P	9SS
Ciclo hexano	Liq. incoloro, inflamable, olor penetrante.	1A	1P, 2P	8SS, 9SS, 3SS
Ciclo hexeno	Liq. incoloro	1A	1P, 2P	3SS, 4SS
Eter	Liq. volátil incoloro, olor aroma.	1A	1P, 2P, 8P	2SS, 1SS, 11SS, 3SS, 15SS
Eter isopropílico	Liq. incoloro, olor etereo	1A	1P, 2P	7SS, 1SS, 11SS, 15SS, 10SS
Tetracloruro de carbono	Líquido no inflamable	1A, 2A, 3A	2P, 13P, 9P	1SS, 10SS, 15SS
Cloruro de metilo	Liq. incoloro, olor etereo	1A	9P, 8P, 6P, 1P	1SS, 11SS, 17SS, 14SS, 10SS, 14SS
Estirol	Liq. incoloro, olor aromático	1P, 2P	1P, 2P	7SS, 10SS, 15SS
Piridina	Liq. incoloro, inflamable	1A, 3A	1P, 2P	7SS, 1SS, 11SS, 10SS, 15SS

CAPÍTULO 3

INCINERACIÓN

3 COMBUSTIBLES QUE SE USAN EN LA INDUSTRIA DE PROCESO

El reciclaje de solventes es una práctica ambiental benéfica, pero que sólo es rentable para los recicladores cuando se trata de sustancias con un valor relativamente alto en el mercado.

Cuando no es rentable reciclar los residuos orgánicos, su destrucción térmica es el método de disposición final más adecuado desde el punto de vista ambiental; sin embargo, es de los métodos más caros debido al combustible que es necesario quemar como fuente de energía y a los costos de construcción y operación de un incinerador.

Un método que combina las ventajas de la incineración a un costo mucho menor, consiste en aprovechar el calor de incineración de algunos orgánicos y utilizarlo como fuente de energía de algún proceso productivo, sustituyendo el combustible convencional derivado del petróleo. Esto es el caso de la tecnología para quemar residuos orgánicos en hornos rotatorios utilizados para la fabricación del cemento. La aplicación de esta tecnología permite la destrucción completa de los residuos debido a las altas temperaturas de operación de dichos hornos y significa un considerable ahorro de energía, para una industria intensiva en el uso de este insumo.

Por lo tanto, significa también participar en las estrategias de minimización de residuos; ya que al sustituir un combustible convencional, se deja de utilizar un recurso energético no renovable que también genera residuos en forma de gases de combustión y de cenizas.

La incineración es una de las posibilidades con la que cuenta el hombre para proceder a la destrucción de los solventes residuales. Un equipo de incineración diseñado adecuadamente permitirá conseguir un afluente tan limpio que se ajustará totalmente a las disposiciones en materia de contaminación del aire.

Puede ser útil clasificar los líquidos residuales, desde el punto de vista de su combustión, en dos tipos⁶:

1) Líquidos combustibles

2) Líquidos parcialmente combustibles

Es evidente que los líquidos no combustibles no pueden ser tratados ni eliminados por incineración.

Hay que suponer que cualquiera de estos tipos de residuos son de naturaleza fundamentalmente orgánica, incluso si la cantidad de esta materia es pequeña.

La incineración de tales sustancias se convierte esencialmente en un problema de combustión directa en la que el aire tiene que ser mezclado con el combustible a cierta temperatura por encima de la ignición, originándose una oxidación rápida y el desprendimiento de bióxido de carbono (CO₂), nitrógeno (N₂) y vapor de agua (H₂O). Hay que tener también aquí muy en cuenta las tres "T" (**Turbulencia, Temperatura, Tiempo**)^{5,6} para que se produzca una buena combustión.

Como lo que va a ser objeto de combustión es un líquido residual, habrá que suministrar el calor necesario para la evaporación de este además de conseguir que se produzca la temperatura de ignición. Como los líquidos se evaporan y reaccionan con mayor rapidez cuando se encuentran en forma pulverizada finalmente divididos, generalmente se utilizan atomizadores para inyectar los solvente residuales líquidos en el equipo de incineración, siempre que el grado de viscosidad de los solventes permita su atomización. Existen muchos residuos que se pueden clasificar como líquidos y que apenas tienen tal naturaleza. Los cienos, los lodos y otras sustancias de gran viscosidad pueden ser sometidos a sistemas de tratamiento por incineración, pero tales sistemas requieren ciertas características especiales.

3.1.1 LÍQUIDOS COMBUSTIBLES⁹

Esta primera categoría esta integrada por aquellos líquidos en los que todas las sustancias contenidas en los mismos, tienen un poder calorífico suficiente como para mantener la combustión en un equipo de combustión tradicional, en un quemador o en cualquier otro aparato, produciendo al quemarse bióxido de carbono (CO₂).

Se pueden utilizar varias reglas prácticas para saber si un solvente residual líquido puede ser considerado como combustible. El residuo habrá de poder ser bombeado a temperatura ambiente o después de haber sido calentado hasta alcanzar un nivel razonable de temperatura. Por lo general, este nivel equivale a unos 400 ó 500 °F, (204 ó 260 °C), ya que resulta difícil el bombeo del alquitrán caliente⁹ o de sustancias parecidas a temperaturas superiores.

También debe ser posible pulverizar el solvente líquido en estas condiciones. Si no puede ser bombeado o pulverizado resultará imposible quemarle como si fuera un líquido, por lo que habrá de someterse al mismo tratamiento que recibe el cieno o un sólido. La incineración de los solventes líquidos residuales es aplicable para aquellos que tienen una viscosidad de hasta de un poise, aunque es conveniente que la viscosidad sea menor.

Para ser considerado como combustible, el solvente líquido residual deberá ser capaz de mantener la combustión en el aire sin la presencia de ningún combustible auxiliar. Esto significa que dicho líquido tendrá que tener normalmente un poder calorífico superior o comprendido entre las 8 000 y 10 000 Btu / libra.

Ello no significa que los líquidos que tengan poder calorífico inferior a las 8 000 Btu/Lb, sean incapaces de mantener la combustión por sí mismos, sino que, como regla práctica, se ha establecido la línea de separación entre la combustibilidad y la incombustibilidad en el valor indicado.

Las sustancias que caen dentro de esta categoría de combustibles pueden ser o **disolventes líquidos ligeros**⁸, tales como el tolueno, el benceno, la acetona y el alcohol etílico, o alquitranes orgánicos pesados y residuos del petróleo crudo, similares a los aceites residuales combustibles.

Los residuos se pueden presentar como una mezcla de viscosidad y poder calorífico intermedio. Estos solvente residuales proceden de las operaciones de limpieza de las plantas químicas y de las refinerías, o bien son los residuos producidos en los procesos de destilación. Como no resulta justificado económicamente, la recuperación de estas sustancias se les quema. El equipo que se utiliza en el tratamiento de este tipo de solventes residuales puede también variar de un fabricante a otro, pero fundamentalmente su forma será la de un aparato de combustión o la de un quemador diseñado para el tratamiento de líquidos residuales que son inyectados mediante un atomizador que funcione a base de vapor de aire o mecánicamente. Si un sistema ha sido diseñado de forma adecuada y existe un espacio abierto suficiente alrededor del aparato de combustión, no se necesita un incinerador secundario, incluso se puede prescindir de la chimenea. Normalmente, estos tipos de quemadores o aparatos de combustión que necesitan que les inyecten una corriente de aire, se caracterizan por tener una llama corta que arde de manera continua sin verse afectada por condiciones atmosféricas, tales como el viento o la lluvia. Estos aparatos permiten la combustión completa en su interior sin necesidad de una cámara secundaria de combustión.

Cuando no se dispone del espacio abierto arriba señalado, se puede instalar un aparato de combustión exterior u horno, unido a los anteriores, que permita la combustión completa de los residuos. Los aparatos de combustión en los que se produce gran desprendimiento de calor exigen cámaras muy pequeñas de incineración secundaria, pero, generalmente, la incineración se suele llevar a cabo en cámaras de combustión de capacidad suficiente como para que se libere calor hasta un total de 25 000 Btu / hr/ Ft³.

El tiempo de permanencia del solvente líquido residual variará entre medio segundo y un segundo.

Esta cámara primaria o secundaria de combustión, según se use una u otra, habitualmente tiene forma cilíndrica y puede estar colocada en posición horizontal o vertical.

La cámara vertical tiene la ventaja de que el incinerador actúa como si fuera su propia chimenea, pero es evidente que no reúne las características de las chimeneas altas. Los incineradores horizontales pueden ser conectados más fácilmente a un conducto de humos o a una chimenea alta.

Muchos solventes residuales líquidos se emplean como combustibles para calderas, precalentadores de aire u otros sistemas destinados a la recuperación de calor, pudiendo aprovechar todos ellos la energía calorífica contenida en los residuos y que se desprende en los sistemas de incineración. Sin embargo, parece que sólo es recomendable la utilización de aparatos de recuperación de calor cuando la cantidad de calor recuperada o el costo del equipo estén justificados desde el punto de vista económico. Si el solvente líquido residual contuviera elementos no combustibles, tales como sales o sustancias inorgánicas que se convirtiesen en compuestos corrosivos al producirse la reacción de combustión, como es el caso de los cloruros o de los fluoruros, en entonces la recuperación de calor resultaría incompatible con estos sistemas y no debería llevarse a cabo.

Como el costo de este tipo de equipo varía ampliamente, según los fabricantes y el sistema empleado, así como la naturaleza de los residuos que se van a tratar, resulta posible adquirir equipos adecuados de incineración para residuos con un grado elevado de combustibilidad, a precios que oscilan entre 250 y 350 dólares por gal/hr de capacidad. En este caso se supone que los solventes residuales son completamente combustibles y que, excepto para las operaciones piloto, no se necesita combustible auxiliar.

3.1.2 LÍQUIDOS PARCIALMENTE COMBUSTIBLES^a

Esta segunda categoría está integrada por los líquidos en los que las sustancias contenidas no pueden mantener la combustión sin la presencia de un combustible adicional por la elevada proporción de elementos incombustibles que les caracteriza, como, por ejemplo, el agua. Un solvente residual parcialmente combustible^a también puede contener sustancias disueltas en su fase líquida, si fueran de naturaleza inorgánica formarían un óxido inorgánico al producirse la combustión y habría que utilizar luego un sistema para ser colectados.

Los solventes residuales líquidos que tienen un poder calorífico menores de 8 000 btu/lb, se pueden considerar como incluidos dentro de la categoría de los parcialmente combustibles. Hay que subrayar, una vez más que esto no es más que una regla práctica y que algunas sustancias con poder calorífico comprendido entre 10 000 y 11 000 btu/lb, son incapaces de sostener por sí solas la combustión. También es importante señalar, en relación con este tipo de residuos, que el método de tratamiento de las sustancias debe ser compatible con el equipo elegido. La viscosidad habrá de ser reducida hasta que las sustancias se puedan bombear y pulverizar, ya sea a la temperatura ambiente o a temperaturas ligeramente elevadas.

Los solventes residuales que entran en esta clasificación generalmente son de naturaleza acuosa y consisten en compuestos orgánicos susceptibles de ser mezclados con el agua. Tales residuos también pueden contener compuestos de azufre, de fósforo o combinación de sustancias orgánicas o inorgánicas no combustibles.

El contenido en materia orgánica de estos solventes residuales puede ser tal que su combustión en hornos que funcionen a altas temperaturas resulte visible, o bien pueden ser tan pobres en esa misma materia que los resultados serían opuestos.

Hay una serie de factores que deben ser tenidos en cuenta al diseñar un incinerador para residuos parcialmente combustibles. En primer lugar, la sustancia ha de ser pulverizada lo más finamente posible de tal forma que se ofrezca la mayor superficie de contacto y así se mezcle más fácilmente con el aire que hace posible la combustión. En segundo lugar, hay que suministrar una cantidad adecuada de aire que se habrá calculado cuidadosamente conforme a la necesidad de oxígeno que requiere la oxidación o la combustión de las sustancias orgánicas de que se trate. En tercer lugar, el calor procedente de un combustible auxiliar, debe ser capaz de elevar la temperatura de los solventes residuales y del aire utilizado en la combustión hasta situarla por encima de la temperatura de ignición de la suspensión orgánica contenida en el solvente residual. A diferencia de lo que ocurre con los residuos combustibles que mantienen la combustión por sí mismos, los parcialmente combustibles no pueden ser inyectados siempre directamente en el aparato de combustión o en el quemador, sino que más bien han de ser pulverizados en la cámara secundaria de combustión.

Si el solvente residual es de escasa combustibilidad, se puede alimentar el aparato de combustión o quemador directamente con ella y el combustible auxiliar. Se alcanzarán temperaturas comprendidas entre 2 200 y 2 300 °F, (1 204 y 1 260 °C), se producirá la combustión completa de las sustancias orgánicas contenidas en los solventes, los productos de combustión podrán ser liberados en la atmósfera. Normalmente, el combustible auxiliar es gas natural o cualquier otro gas combustible, ya que existen muchos problemas en cuanto al diseño de quemadores que lleven un atomizador para el combustible líquido y otro para los solventes líquidos.

Los inyectores dobles no se prestan a la concetricidad. Una segunda solución puede consistir en la utilización de una cámara de combustión, como se ha indicado más arriba, que se puede encender con un quemador o con un combustible convencional ya sea gas o aceite, este último si se introduce en finas gotas que se quema más fácilmente.

Los residuos sólidos pueden ser alimentados hacia el incinerador, a granel o en contenedores usando mecanismos de transporte o por gravedad.

Los residuos son quemados en la cámara de combustión, la cual es parecida a una estufa que contiene un quemador, el cual está diseñado para retener y mantener temperaturas en la que el gas natural se mezcla con el aire de combustión. El solvente residual se puede introducir mediante el uso de uno o varios atomizadores, que dependerá del volumen de solventes residuales y de la mejor disposición geométrica para su mezcla. Evidentemente el sistema que proporciona la mejor mezcla y el mejor exceso de aire nos da la disposición óptima y el costo de combustible más bajo.

El equipo que se utiliza para el tratamiento de este tipo de solventes residuales es generalmente un horno cilíndrico, vertical u horizontal, revestido de un material refractario, con un quemador de combustible auxiliar colocado o bien al final del revestimiento cilíndrico o de forma tangencial al mismo. El tamaño del incinerador dependerá de la liberación de calor que se produzca en el sistema, de la cantidad de solventes residuales inyectados y de la cantidad de aire de combustión que haya de utilizarse. La mezcla se consigue mediante deflectores u otros mecanismos parecidos y la temperatura del incinerador variará según el tipo y la cantidad de solventes residuales. En la mayoría de los casos resulta posible incinerar la mayor parte de las mezclas orgánicas acuosas a temperaturas por debajo de 1 800 °F (982°C). Como ocurre con los residuos gaseosos, hay que determinar previamente la temperatura de autoignición de los solventes residuales líquidos, y el incinerador deberá funcionar a una temperatura varios centenares de grados por encima de aquel punto.

Los productos de la combustión que se desprenden de este tipo de incineradores normalmente salen directamente a la atmósfera o bien a través de una chimenea. Si los solventes residuales son muy escasos, bajo ciertas condiciones atmosféricas se podrá apreciar claramente una columna de vapor.

Sin embargo, la temperatura de esta columna es suficientemente alta como para que el vapor de agua desaparezca mucho antes de que su temperatura se reduzca por debajo del punto de fusión.

Raramente se lleva a cabo la recuperación de calor en estos sistemas, debido a que funcionan a bajas temperaturas. Las temperaturas de los gases en la chimenea, normalmente iguales o inferiores a 1 500 °F (816 °C), exige una superficie muy grande para que se realice intercambio de calor. Cuando se trata de solventes residuales líquidos, prácticamente la posibilidad de recuperar el calor es mínimo, es posible utilizar el calor desprendido de los líquidos para calentar aire o agua o proceder a cualquier otro tipo de recuperación, pero no es muy conveniente. Si se utiliza un aparato de recuperación, su temperatura habrá de ser mantenida siempre por encima de la condensación del vapor. Este tipo de sistemas puede emplear una caldera que aproveche el calor residual.

En algunas ocasiones puede resultar posible la concentración de los solventes residuales acuosos parcialmente combustibles, procediendo a su evaporación antes de incinerarlos; dicha concentración permite que los solventes residuales se puedan incinerar como líquido combustible, con lo que se reduce el tamaño del equipo. También se puede conseguir con ello rebajar los costos del combustible que se necesita. En el incinerador hay que elevar la temperatura de toda el agua contenida en los residuos hasta una temperatura a la que puedan ser destruidas las sustancias combustibles, mientras que la preevaporación únicamente exige elevar la temperatura del agua hasta que ésta alcance el punto de ebullición. Esto representa generalmente un ahorro importante en lo que a combustible se refiere, pero no siempre procede, porque la evaporación es una forma de contaminar el aire.

3.1.3 COMBUSTIBLES ALTERNOS PARA SER INCINERADOS EN HORNOS DE CEMENTO

Un combustible alternativo es una mezcla de residuos orgánicos, predominantemente de disolventes y aceites, provenientes de diversos procesos industriales, que puede ser utilizada con una finalidad energética en otro proceso productivo; en este caso, en la manufactura de cemento.

Los dos objetivos de quemar combustibles alternos en hornos de cemento son los siguientes:

- La destrucción térmica de los residuos, con una eficiencia del orden de 99.9%.
- La recuperación de energía debida al calor de combustión de dichos residuos.

Lo que hace posible utilizar hornos para la fabricación de cemento como medio alternativo de incineración de residuos, son sus características de construcción y las condiciones de su operación. Dentro de éstas destacan tres, llamadas " las tres T's":

- * Temperatura de operación del horno
- * Turbulencia de los vapores y gases
- * Tiempo de residencia de los vapores y gases

Dichas condiciones, garantizan la destrucción térmica debida a la completa combustión de prácticamente cualquier residuo orgánico.

El uso de estos combustibles alternos no debe alterar las condiciones de operación del horno y normalmente puede sustituir al combustible convencional en una fracción de hasta el 40%, dependiendo de las exigencias en materia de legislación ambiental de cada país. Sin embargo, las compañías cementeras que la utilizan, sustituyen de un 10 a un 15% de combustóleo por combustible alternativo. Una de las razones de este bajo nivel de sustitución es la insuficiente recolección de residuos destinados a este propósito; y otra, que en México esta tecnología es bastante reciente, y no se tiene la experiencia que garantice su uso confiable.

En el caso de los combustibles alternos líquidos, y sólidos pulverizados, su alimentación al horno de cemento se hace en el mismo lugar en que se alimenta el combustóleo, pero a través de un quemador especial y de una válvula de control autónoma, que se cierra automáticamente si se detecta cualquier desviación de las condiciones óptimas de operación. Si esto ocurriese, de inmediato se abrirá la línea de combustóleo pesado.

En México es muy viable la aplicación creciente de esta tecnología. Ocupamos el décimo lugar dentro de los países productores de cemento (información proporcionada por la Cámara Nacional del Cemento), y existen hoy en día 35 plantas cementeras distribuidas en todo el país.

La generación de residuos industriales como ya lo habíamos visto en el capítulo uno, se estima en 450 000 toneladas diarias, de las cuales se calcula, que 14 500 corresponden a residuos peligrosos. Anualmente, esta última cifra significa 5.3 millones de toneladas.

Un estudio realizado en 1992 por las compañías *CEMTECH LP* y *CHEMICAL WASTE MANAGEMENT DE MEXICO, S.A. DE C.V.*, estima que de éstas 5.3 millones de toneladas métricas, 431 300 (475 000 toneladas cortas); es decir, poco más del 8% podrían ser residuos susceptibles de ser utilizados como combustibles alternos en hornos de cemento.

México cuenta con una infraestructura adecuada para aplicar la tecnología; de incinerar solventes residuales en hornos de cemento, especialmente, por la gran cantidad de plantas cementeras existentes, y por su distribución en todo el territorio nacional.

Actualmente, todavía ninguna empresa cementera mexicana cuenta con las autorizaciones definitivas para quemar residuos como fuente alterna de energía en sus hornos de cemento. Los hornos que actualmente lo están haciendo, se encuentran en la fase llamada de Protocolo de Prueba, requisito exigido por el Instituto Nacional de Ecología, para asegurarse que la combustión a la que se hace referencia, no tendrá efectos negativos en el ambiente.

Debido a la actual fase de prueba, los hornos cementeros que actualmente están quemando combustibles alternos, se mencionan a continuación, ver tabla 18:

Tabla 18. Plantas cementeras Mexicanas que actualmente están quemando combustibles alternos

PLANTA	RESIDUOS USADOS COMO COMBUSTIBLES. ALTERNOS
CEMENTOS MEXICANOS, Pta. Torreón Coah.	
CEMENTOS MEXICANOS, Pta. Huichapan, Hgo.	Llantas, aceites, solventes
CEMENTOS TOLTECA, Pta. Zapotiltic, Jalisco	Aceites, solventes
CEMENTOS APASCO, Pta. Ramos Arispe, Coah.	Aceites, Solventes
CEMENTOS PORTLAND MOCTEZUMA, Pta. Jiutepec, Mor.	Aceites
COOPERATIVA LA CRUZ AZUL, Cd. Cruz Azul, Hgo.	Aceites y solventes

FUENTE: Información proporcionada por la Cámara Nacional del Cemento

Vale la pena destacar que las plantas que queman solventes como combustibles alternos, disponen de los servicios propios o controlados de una planta formuladora de los combustibles

La estrategia del uso de solventes orgánicos como combustibles alternos en hornos de cemento implica todos los recursos necesarios para poder llevarla a la práctica: desde la recolección, hasta la combustión de éstos en los hornos de cemento.

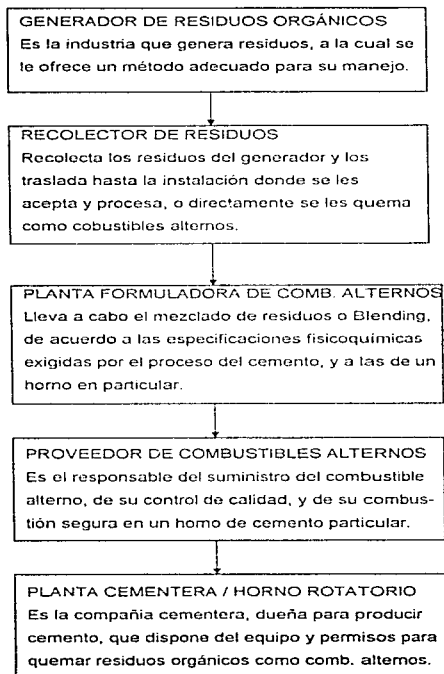
Los elementos principales para este caso son los siguientes:

- 1.Recolección de los residuos.
- 2.Mezclado y formulación.
- 3.Control de calidad y abastecimiento.
- 4.Combustión en un horno de cemento.

A continuación se presenta a manera de diagrama la estrategia desde la generación de un residuo hasta su combustión, en donde existe la posibilidad de simplificación, que consiste en evitar el mezclado de residuos para formular los combustibles alternos, en ingles se conoce como Fuel Blending. Esto se puede lograr cuando se queman como combustibles alternos, residuos de excepcionales propiedades fisicoquímicas, que garantizan la uniformidad del tipo de combustible, y su calidad

La simplificación mencionada añade también al control de calidad del combustible, pues se trata de un tipo de residuo; adicionalmente, significa evitar la inversión en el equipo de mezclado de residuos para la formulación de los combustibles alternos. Este es el esquema de operación de por lo menos una de las compañías cementeras mexicanas que están utilizando combustibles alternos en su proceso de elaboración de cemento.

DIAGRAMA ESTRATÉGICO PARA EL USO DE COMBUSTIBLES ALTERNOS



3.2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA INCINERACIÓN

La incineración es la combustión de los materiales mediante una flama controlada, en una cámara cerrada (compartimento).

Entre los principales beneficios de este proceso, esta la eliminación de los elementos tóxicos presentes en los residuos peligrosos al destruir los compuestos orgánicos contenidos en los residuos, así como una reducción en el volumen de los mismos, y convertirlos en sólidos al vaporizar el agua y los demás líquidos que puedan contener los compuestos orgánicos, que son quemados en un alto intervalo de temperaturas.

La madera, aceite y carbón por ejemplo, están compuestos por mezclas orgánicas que se queman a temperaturas relativamente bajas.

Algunos compuestos orgánicos, incluyendo los encontrados en ciertos residuos peligrosos, se queman con más dificultad y deben ser sometidos a temperaturas más altas. Como consecuencia los incineradores de residuos deben de tener temperaturas extremadamente altas para asegurar que virtualmente todos los compuestos orgánicos en los residuos sean destruidos. Sin embargo, la incineración no destruye los compuestos inorgánicos; tales como sales o metales, y tampoco los compuestos de carbón carentes de hidrógeno, tales como monóxido de carbono (CO) y bióxido de carbono (CO₂).

3.2.1 ETAPAS DE LA INCINERACIÓN

La incineración implica el cumplimiento de las siguientes etapas⁵:

- 1a. Etapa. Los residuos son alimentados al incinerador.
- 2a. Etapa. Los residuos son incinerados, destruyendo sus compuestos orgánicos, generando productos residuales en forma de cenizas y gases.
- 3a. Etapa. La ceniza es recolectada, enfriada y removida del incinerador.
- 4a. Etapa. Los gases se enfrían, se limpian, y se liberan a la atmósfera a través de la chimenea o tiro del incinerador.

El equipo específico usado para cada una de las etapas mencionadas, depende del tipo de incinerador y de las características físicas o químicas de los residuos para los cuales el incinerador se ha diseñado. En algunos sistemas, los residuos son precalentados antes de que entren a la cámara de combustión en donde se registran temperaturas más altas, la figura 2 muestra el flujo de un sistema típico de incineración para una amplia variedad de residuos.

Durante el quemado los residuos son alimentados al incinerador en forma continua. Los mecanismos de alimentación son diversos: los residuos líquidos son frecuentemente bombeados al incinerador a través de aspersores y equipos que cortan el líquido y permiten su deposición en finas gotas que se queman fácilmente, los residuos son quemados en la cámara de combustión, la cual es parecida a una estatua que contiene un quemador el cual está diseñado para retener y mantener temperaturas extremadamente altas. En el momento en que los residuos son calentados, éstos se convierten en gases. Los gases son mezclados con aire y pasados a través de flamas extremadamente calientes. En cuanto la temperatura de los gases se eleva, los compuestos orgánicos comienzan a descomponerse en átomos. Estos átomos se combinan con el oxígeno del aire para formar compuestos inorgánicos estables, tales como CO_2 y H_2O .

Dependiendo de la composición de los residuos, otros componentes inorgánicos tales como HCl se pueden producir. A esta acción se le llama **combustión⁵**.

Las temperaturas en las cámaras de combustión varían, pero esta generalmente en un intervalo de 900°C a 1 400°C, (1 652 a 2 552 °F), temperaturas superiores a este intervalo, son necesarias para descomponer compuestos orgánicos difíciles de quemar. Los residuos son generalmente mantenidos a tales temperaturas por varios segundos. En muchos incineradores, la combustión ocurre en dos cámaras. La combustión de los residuos orgánicos fáciles de quemar se efectúan en la primera cámara. Para los compuestos que son más difíciles de quemar, la combustión se completa en la segunda cámara, después de que estos han sido convertidos en gases y parcialmente quemados en la primera cámara.

3.2.2 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA INCINERACIÓN

Los tres factores que influyen en la combustión de los residuos, son⁶:

La temperatura de operación de la combustión

El tiempo de operación de la combustión

La turbulencia o grado de mezclado de los residuos con aire (un factor importante y determinante es la disponibilidad de oxígeno durante el quemado).

Estos tres factores juntos, son de gran importancia para establecer una buena combustión.

Ahora bien, como ya se menciona, se puede decir que los sistemas de incineración están diseñados para destruir solamente residuos orgánicos;

sin embargo muchos de los residuos incinerados también contienen sustancias orgánicas no combustibles, así mismo la incineración reduce el volumen de los residuos. La extinción de los componentes orgánicos, incluye sustancias tóxicas que constituyen una amenaza para la salud y el ambiente.

Los residuos a incinerar, se presentan como líquidos, sólidos o ambos en combinación.

Los sistemas comerciales de incineración de residuos peligrosos manejan una amplia gama de residuos, no obstante muchos de los incineradores son específicos para residuos líquidos.

La incineración es un proceso simple cuando es visto de manera superficial. Los compuestos orgánicos están asociados con aquellos que contienen carbono, hidrógeno y algunas veces oxígeno; con la posible presencia de metales y no metales como son halógenos y nitrógeno.

Esto hace a la química de la combustión fácil de descifrar. Desafortunadamente, esta química, se aplica al caso en el que las reacciones sean completas, pero en la combustión frecuentemente no es así.

Cuando la combustión es completa, existe una buena oxidación de los componentes orgánicos carbono e hidrógeno, para lograr esto se requiere de una mezcla adecuada del aire (contiene solamente 21% de oxígeno por volumen) con el carbono e hidrógeno del combustible (residuo), para obtener un producto estequiométrico de dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). El aire también contiene 79% de nitrógeno, el cual es inerte, por lo que se mantiene constante durante el proceso de combustión, pero que a altas temperaturas de incineración llega a generar NO_x .

Un sistema completamente homogéneo (reactor bien agitado) requiere a su vez de tiempo y turbulencia para oxidar completamente el carbono e hidrógeno, lo cual ocurre a una temperatura determinada. Así las tres "T" de la combustión afectan la reacción. La disminución de uno de estos factores debe de

compensarse con los otros dos para lograr la combustión completa, por esta razón pocas reacciones de combustión son completas a su mínima temperatura y aire teórico. Si la combustión es vista como un triángulo isósceles, con tiempo, temperatura y turbulencia en los tres lados, entonces un decremento en la longitud de un lado requiere un incremento compensatorio en los otros dos.

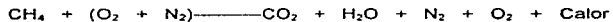
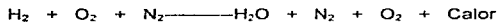
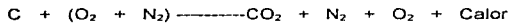
3.2.3 DIFERENCIA ENTRE COMBUSTIÓN Y INCINERACIÓN

La incineración y la combustión, son un proceso por el cual un sólido o líquido residual es convertido en cenizas mediante el uso de aire a altas temperaturas (usualmente de 800 a 1000°C).

El término incineración hace referencia a un producto (cenizas), mientras que el término combustión tiene connotaciones de tipo energético o de producción de energía.

3.2.4 REACCIONES TÍPICAS DE LA COMBUSTIÓN

Las reacciones típicas de la combustión son⁵:



3.2.5 TECNOLOGÍAS APLICABLES A LOS SISTEMAS DE INCINERACIÓN

Existen diversas clases de tecnologías para el tratamiento térmico, las cuales se mencionan a continuación:

- a) Horno Rotatorio
- b) Lechos Fluidizados
- c) De Inyección líquida
- d) De Hogar Múltiple
- e) De Hogar Fijo
- f) Oxidación húmeda
- g) Incinerador líquido
- h) Horno de parrillas

De las tecnologías mencionadas, nos enfocaremos en esta tesis a la tecnología de incineración por medio de un horno rotatorio, ya que es una de las tecnologías que hoy en día se está utilizando en la industria cementera.

A continuación se da una breve descripción de cada uno de los equipos mencionados:

- a) Incinerador por inyección líquida.

Este tipo de incinerador consta de un sistema de inyección líquida para quemar desechos con valores caloríficos altos, y de materiales de combustión fácil. Muchos de ellos crean gases ácidos que tienen que ser removidos por sistemas de depuración.

Incineradores de hogar múltiple.

Los incineradores de múltiples etapas al principio no fueron considerados como incineradores; fueron utilizados como un instrumento para tostar rocas y minerales de varias minas y para el refinamiento de operaciones, posteriormente fue aplicado a un mercado de crecimiento rápido, disposición de desperdicios de lodos. Este sistema aparece en la época de 1960-1970 cuando las regulaciones para la contaminación de aire no eran tan fuertes.

Incinerador de hogar fijo.

Los incineradores de aire controlado son básicamente como el sistema anterior con una sección de quemado después de la sección principal, la que quemaría los productos incompletos de la combustión de la primera sección. Este sistema era pequeño y modular y fue utilizado durante 1970 para la destrucción de desperdicios de industrias y algunos materiales peligrosos.

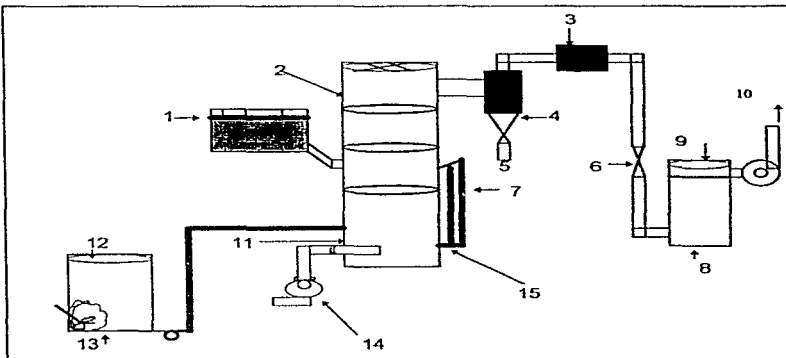
3.3 LECHO FLUIDIZADO

La tecnología de un incinerador tipo lecho fluidizado se caracteriza, porque su cámara de combustión esta constituida de un material granular inerte (p.ej. arena), en donde el aire es impulsado a través de esta, este movimiento provoca el mezclado entre el desecho y el aire permitiendo así que se quemen partículas de mayor tamaño.

En este tipo de incineradores, así como en muchos otros, algunos de los parametros más importantes a mencionar son²⁹:

Un mezclado perfecto entre el gas y el sólido, así como un control de temperatura estable y un tiempo de residencia adecuado, ver fig. 3.

Figura 3. Sistema de un lecho fluidizado para la combustión de desechos peligrosos



- 1.- Alimentación hopper de desecho sólidos
- 2.- Cámara de reacción secundaria
- 3.- Extinguidor
- 4.- Ciclón para gases calientes
- 5.- Cenizas secas
- 6.- Venturi
- 7.- Elevador del reciclado de la cama
- 8.- Cama del lavador empacado
- 9.- Demister
- 10.- Salida de gases limpios
- 11.- Lecho fluidizado
- 12.- Tanque de alimentación de desechos líquidos y lodosos
- 13.-Ajitador del tanque
- 14.- Ventilador de aire para el lecho fluidizado
- 15.- Descarga de los inertes esterilizados

El sistema de fluidización de aire se encuentra integrado por un ventilador especial que se encarga de distribuir el flujo de aire por la parte inferior del lecho, formando así una mezcla gas-sólido con ciertas características físicas parecidas a las de un fluido (aire), esto ocasiona que los sólidos de un tamaño determinado de partículas aproximado a 1 mm (0.5 μg .), sean alimentadas a través de una serie de orificios de inyección neumática inerte operada directamente en el mismo lecho²⁷. Subsecuentemente, los sólidos eluidos son capturados y retornados parcialmente a la zona de fluidización a lo largo de la sección de combustión.

La temperatura ideal para diseñar un lecho fluidizado se encuentra en un intervalo aproximado de 650 a 1200°C (1200 a 2192°F), para desechos de refinería la temperatura de diseño es aproximadamente de 700 a 815°C (1300 a 1500°F).

Existen dos métodos de distribución de aire para la fluidización en este tipo de incineradores, estos son²⁸:

Lechos no profundos (menor a 0.9 m ó 3 ft)

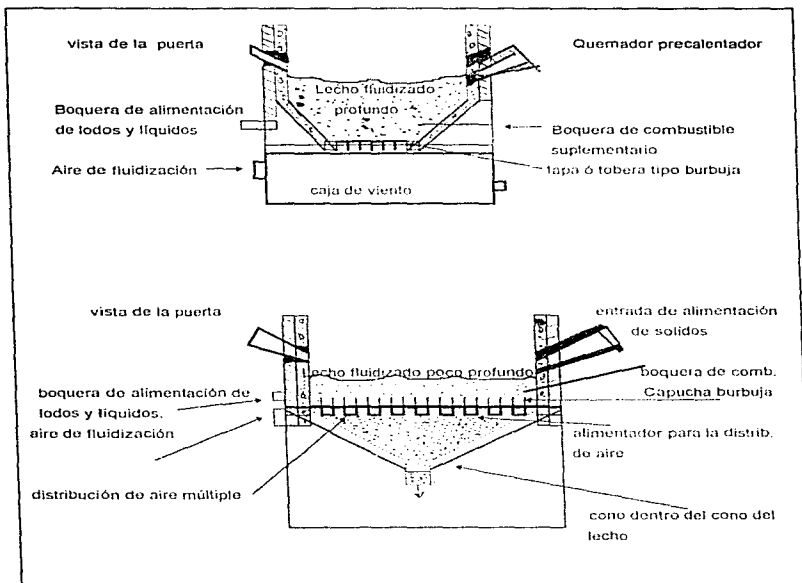
Lechos profundos (mayor a 1/8, 1/4 M ó 1/2 ft).

En este último la profundidad del lecho es directamente proporcional a la caída de presión, este parámetro afecta la potencia requerida del ventilador al proporcionar el aire al sistema, por esta razón los lechos pocos profundos se utilizan típicamente para incinerar desechos peligrosos en cambio los profundos se usan para procesos de catálisis, ver fig 4.

Residuos que no son adecuados para el sistema de fluidización:

- Pedazos de desechos de gran tamaño que no pueden ser fragmentados a menos que sean de un tamaño aproximado de 2.5 cm.
- Un alto contenido de sodio (Na), ya que puede provocar la degradación del refractario y la escoriación.
- Un alto contenido de metales pesados, ya que puede dar como resultado la volatilización de los metales en niveles de emisión no aceptables.
- Constituyentes de bajo punto de fusión (menores de 875°C), ya que pueden cuasar dificultades operacionales.

Figura 4. Métodos de distribución de aire de fluidización



3.4 HORNO ROTATORIO

Este tipo de hornos de incineración es uno de los de mayor utilización en la industria del cemento, en procesos de secado rotativo y más tarde como incineradores de residuos peligrosos, ya que se encontró que son relativamente simples estos sistemas para quemar o incinerar una gran variedad de desperdicios.

3.4.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA UN HORNO ROTATORIO

Dentro de este protocolo de pruebas es necesario considerar las condiciones para que un residuo sea empleado como combustible suplementario, las cuales se mencionan a continuación¹³.

- Deberá ser combustible
- Contenido significativo de energía
- Mínimo contenido de cloro
- Bajo contenido de metales

Los residuos que no deben introducirse a los hornos son:

- Bifenilos policlorados (pbc's)
- Materiales altamente corrosivos
- Materiales con alto contenido de humedad
- Materiales radioactivos
- Materiales explosivos
- Materiales biológicos o residuos de hospitales

Uno de los compuestos orgánicos que es considerado de los más peligrosos es aquel que contiene, cloro y usualmente se le llama hidrocarburo clorinado. La mayoría de los procesos industriales como los agrícolas, farmacéuticos y de refinería generan este tipo de compuestos. El cloro tiende a reducir la combustión debido a que reduce el valor calorífico y también crea un combustible más difícil de quemar. Y si es quemado de manera incorrecta, el material clorinado tenderá a formar un polvo negro como resultado de una mala combustión, oxígeno, nitrógeno, vapor de agua y dioxinas.

Los residuos apropiados para emplearse en hornos de cemento son:

⇒ *Generales:*

Solventes

Aceites usados

Productos intermedios

Productos fuera de especificación (pinturas, adhesivos, etc.)

⇒ *Específicos:*

Alcoholes

Cetonas

Aldehídos

Derivados del petróleo

Acetaldehídos

Compuestos aromáticos

Compuestos alifáticos

Acidos grasos

Otras de las condiciones importantes para que un residuo sea empleado como combustible complementario son los beneficios ambientales que proporcionan, entre estos se encuentran¹³:

- a) Ahorro en el uso de combustibles primarios.
- b) Recuperación de energía.
- c) Alternativas de solución para la disposición final de los residuos mediante una tecnología limpia.
- d) Tecnología confiable y aprobada que se ofrece como la mejor alternativa de disposición final de residuos industriales de forma segura al ambiente.
- e) Preservación y mantenimiento de un ambiente limpio.

3.4.2 PANORAMA DE LA TECNOLOGÍA Y SUS APLICACIONES

Dos de las más importantes condiciones de operación para un tipo de incinerador propio es la temperatura y el tiempo de residencia²⁰.

Estas condiciones junto con las características químicas y físicas de los residuos, determinan el tamaño del incinerador.

El horno rotatorio esta provisto de un número de funciones que son necesarias para la incineración. Por sus herramientas para el transporte y el mezclado de sólidos, suministra un mecanismo para el intercambio de calor, sirve como contenedor huésped para reacciones químicas.

Los hornos rotatorios son útiles tanto para sólidos, todos, y líquidos y es capaz de ir mezclando y procesando líquidos y sólidos simultáneamente²¹.

Los hornos emplean para su proceso temperaturas de 1 370°C (2 500°F), con un flujo de aire de cientos de miles de pies cúbicos por minuto (ft³ / min) estos son los más comúnmente utilizados en la industria.

La temperatura ideal de trabajo en estos hornos rotatorios para destruir los desechos peligrosos e impurezas es de 1 100°C (2 000°F).

3.4.2 CONDICIONES DEL PROCESO

Cuando determinamos usar un horno para procesar ciertos residuos, es principalmente necesario caracterizar el material que será procesado.

Un análisis químico del material indicará, si ocurrirá o no ocurrirá alguna reacción exotérmica o endotérmica durante el procesamiento. Esto tendrá un impacto directo sobre la cantidad de combustible requerido y el volumen de gases generados durante el proceso.

El calor específico de el material deberá ser conocido para calcular el calor requerido y de esta forma hacer llegar la temperatura a un ambiente de procesamiento ideal.

Teniendo caracterizado el material para ser procesado, las aplicaciones específicas podrán ser establecidas. La temperatura de procesamiento y el tiempo de residencia pueden llegar a ser conocidos en estos puntos. Si esto no fuera así, entonces se hacen pruebas a escala o por lote y banco (bench) que son requeridos para establecer los parámetros del proceso.

El horno puede ser elegido para una carga de 5 a 10% a su volumen interno, en cuyo caso el tiempo de residencia será relativamente corto (1 h o menos). La transferencia de calor en la zona de procesamiento es principalmente por radiación desde la pared del horno. La relación de la pared del horno a la superficie de la cama se incrementa, cuando se reduce la carga del horno. Por otro lado, para un horno altamente cargado resulta mucho mejor si el lecho gira lentamente, propagándose así el calor en la mayor parte del lecho del horno.

Si el tiempo de residencia requerido es relativamente largo (mayor a 1 hora), se hará un represamiento en la descarga de material al final del horno, con este represamiento se incrementa el tiempo de residencia en un horno dado, además, con los ombalsamientos el cargamento del horno se incrementa. Desde un punto de vista práctico el cargamento en los hornos no podrían exceder de un 15 a 20 % del volumen interno del horno. Un análisis en el tamaño de las partículas será requerido para calcular el potencial de entrada de polvos en la corriente de los gases del proceso. El tamaño del material también impactará directamente sobre el tiempo de residencia requerido a las temperaturas de procesamiento. El valor calorífico de los materiales y la humedad son factores que deben considerarse sobre las cantidades de combustible y a volúmenes del gas del proceso. No es deseable el contenido de humedad en un material que lo convierte o lo haga de consistencia pastosa, no es, ya que puede producir aglomeración de material. En estas situaciones el uso de cadenas en el horno inhibe la formación del aglomerado y rompe algunas de estas aglomeraciones formadas.

Para una velocidad de producción deseada, el tamaño del horno y sus cargas son una función de la densidad másica del material que se va a procesar debe obtenerse por medio de un experimento de proceso. El ángulo dinámico de reposo del material afecta el tiempo requerido para transportar el material a través de el horno. Por lo tanto afecta el tiempo de residencia del horno. Resumiendo las siguientes características de el material que se va a procesar en un horno rotatorio, éstas deben ser establecidas antes de que sea diseñado y son como sigue:

- Composición química
- Calor específico
- Consistencia del tamaño (distribución)
- Valor calorífico
- Densidad másica
- Ángulo dinámico de reposo
- Contenido de Humedad

3.4.3 CRITERIOS DE DISEÑO

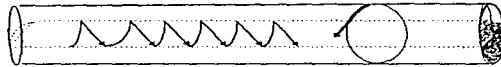
El flujo de material a través de un horno rotatorio se determina por su pendiente y la velocidad rotacional, así como por las características del material que se procesa.

El horno es instalado con una pendiente ligera de tal forma que el lecho de los sólidos avance a través del horno por la fuerza gravitacional.

Cuando el horno tiende a rotar, el material sigue la rotación hasta que éste rompa la superficie de el lecho y se desplome en la pendiente de la superficie del lecho.

La pendiente del horno produce un ligero movimiento adelantado hacia el vertedero final, ver fig 5.

Figura 5. Movimiento axial a través del horno



La fig. 6 ilustra algunas de las terminologías comunes usadas para describir el sistema de flujo de los sólidos en el horno. El tiempo de residencia en el horno es expresado por la siguiente fórmula²³:

$$T = \frac{1.77 (\theta)^{0.5} F}{SDN}$$

Donde:

T = Tiempo de residencia en minutos (min).

θ = Ángulo dinámico de reposo, grados desde la horizontal

L = Longitud del horno en pies (ft).

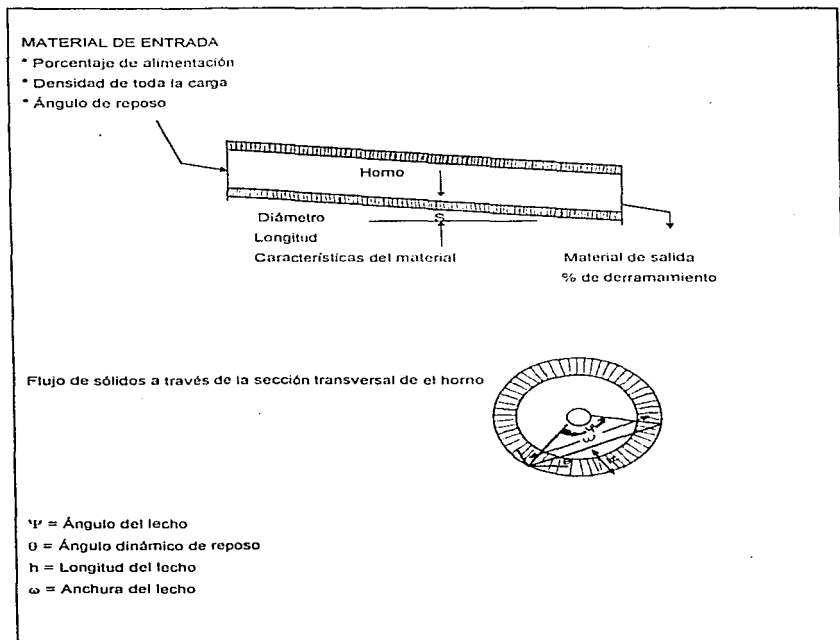
S = Pendiente del horno en grados desde la horizontal

N = Velocidad rotacional del horno en revoluciones por minuto

F = Factor, 1.0 cuando el horno no está represado; > 1.0 cuando el horno se encuentra represado

D = Diámetro interno en (ft).

Figura 6. Flujo de sólidos en el horno



Factores de el horno rotatorio

$$\text{FRACCIÓN CARGA} = \% \text{ DE CARGA} = \frac{\text{ÁREA DEL LECHO}}{\text{ÁREA TOTAL DE LA SECCIÓN DEL HORNO}}$$

Algunos factores comunes designados del horno rotatorio se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Factores para el horno rotatorio

PENDIENTE	S	0	(0) ^{0.5}	1.77(0) ^{0.5}
1/4	1.192	15	3.873	6.855
5/16	1.491	20	4.472	7.915
3/8	1.750	25	5.000	8.650
7/16	2.087	30	5.477	9.694
1/2	2.385	35	5.916	10.471
9/16	2.654	40	6.324	11.193
5/8	2.980	45	6.708	11.873

La pendiente del horno (S), normalmente tiene intervalos de 0.02 m/m a 0.04 m/m (0.25 in/ft a 0.5 in/ft). Al incrementar la pendiente se hace mayor el transporte inicial del material en el el horno. Las pendientes más empinadas generalmente se emplean en casos donde el material disminuye por unidad de volumen esto es como se va desarrollando el proceso.

La velocidad rotacional usualmente va desde 0.5 r/min a 1.5 r/min, para cargas pesadas y de 1 a 3 r/min, para cargas ligeras.

Como se puede ver, hay un número infinito de combinaciones de longitudes y diámetros que darán como resultados tiempos de residencia requeridos. Generalmente, para aplicaciones con desechos peligrosos sólidos la proporción L/D esta en un intervalo de 3:1 a 10:1.

La carga del horno esta expresada por la siguiente fórmula:

$$L = (Q / VA) * 100$$

Donde:

L = longitud, %

Q = porción de material volumétrico, (ft³ / min).

V = porción de material transportado, (ft / min).

A = área interna a través de la sección transversal del horno, (ft²).

Por lo tanto el porcentaje de carga puede incrementarse al instalar una represa al final de la descarga del horno. Este represamiento afecta la profundidad del lecho a lo largo de la longitud entera del horno como se muestra en la fig 7.

Después de que el tamaño del horno es seleccionado, la velocidad de procesamiento en el horno se calcula.

Dependiendo del análisis del tamaño de partículas del material procesado, las velocidades del gas de procesamiento podrían caer en un intervalo de 165 a 1 000 m/min (500 a 3 000 ft/min.); las velocidades bajas corresponden a las partículas finas. La relación de longitud / diámetro (L/D), deberá ajustarse para dar la velocidad del gas de proceso designada. Las velocidades del gas de proceso deben caer dentro del intervalo, mencionado, la cantidad del gas de proceso resulta de la combustión de los combustibles, de la evaporación del agua y de cualquier producto gaseoso que provenga de las reacciones químicas.

El combustible requerido se establece por el calor necesario para elevar la temperatura del proceso para la evaporación del agua, y satisfacer alguna reacción química endotérmica; menos el calor suministrado por el material y aquel suministrado por alguna reacción exotérmica.

La radicación de calor desde la coraza del horno y el calor sensible contenido en la corriente existente del gas de proceso, en el horno debe también ser compensado por dos métodos de operación que se emplean para los desechos peligrosos sólidos y que son:

Flujo paralelo.

Flujo en contra corriente.

El objetivo principal es la volatilización de los compuestos orgánicos para su subsecuente destrucción en la corriente de gas, el material que va ser descontaminado se alimenta en el mismo extremo en que el horno es encendido.

Los sólidos y gases viajan en la misma dirección, esto se conoce como flujo paralelo.

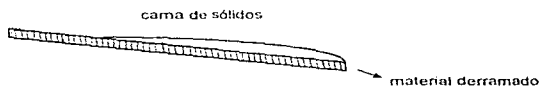
La operación en flujo paralelo es recomendado cuando el material a procesar tiene un alto valor como combustible o cuando ocurren reacciones químicas exotérmicas.

En este caso, tiene la corriente de gas más tiempo de residencia para destruir los orgánicos y proveer una mejor utilización del gas liberado

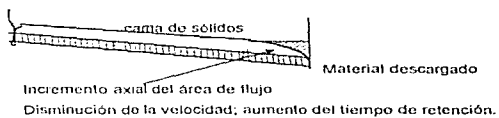
En situaciones donde existen cantidades significativas de agua, esta deberá ser evaporada y donde ocurren reacciones químicas endotérmicas, se recomienda una operación a contracorriente debido a que hay mayor eficiencia en el combustible. El horno es alimentado en el extremo opuesto donde éste se enciende, los gases y sólidos viajan en direcciones opuestas.

Fig. 7. Perfil de un lecho con represamiento y sin represamiento

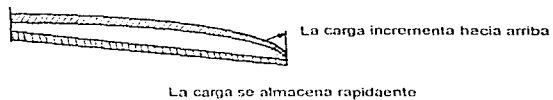
a. Cama sin represa



b. Con represamiento de espesor finito



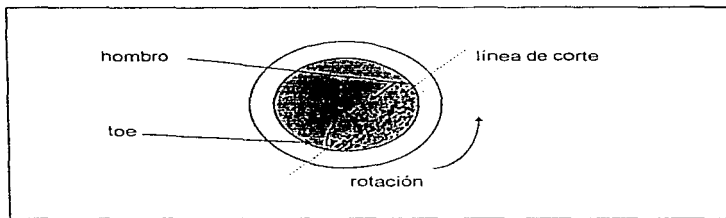
c. con represamiento de apreciable espesor.



3.4.4 TRANSFERENCIA DE CALOR

La mezcla de sólidos en el lecho ocurre solamente sobre la línea de corte, sobre una capa en forma de cascada formada por el material, ver fig.8. Si la carga tiene extremos (chicos y grandes) en el tamaño de partículas con un alto nivel de partículas finas de (15 a 25%), estas partículas finas podrían recogerse en un "riñón frío" y la masa resultante estorbaría menos la penetración de los gases.

Fig.8. Flujo de sólidos a través de la sección⁶



La transferencia de calor parece ser proporcional al cuadrado del diámetro interno del horno. Las reglas del pulgar que atribuyen de un 60 a 80% de la transferencia de calor por radiación están constantemente en investigación. Numerosas pruebas y demostraciones indican que la mayor parte de la transferencia de calor puede ser atribuida a la transferencia de calor por convección, el calor transferido a través de superficies planas (cuerda y arco segmentos) la permeabilidad de la cama, y el intercambio de masa de la carga en cascada parece contar para la mayoría del resto de transferencia de calor.

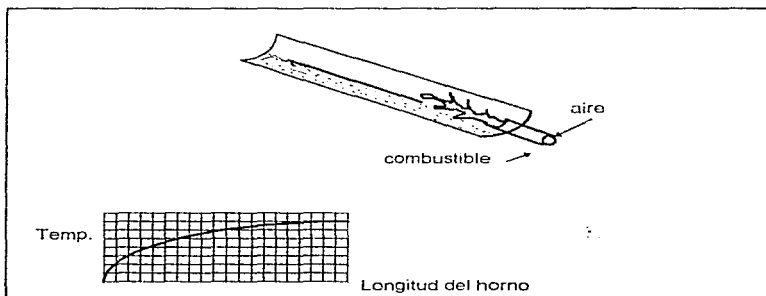
El camino libre promedio para la radiación aumenta linealmente con el diámetro y, por tanto los gases del horno son más emisivos. Teóricamente, las temperaturas de la pared interna pueden ser menores con hornos más grandes.

Si la flama es más suelta acoplada convectivamente a la pared, estas pueden disminuir la transferencia de calor on el lecho bajo. La experiencia práctica en hornos con una longitud de 7.6 m (25 ft) ha mostrado que en este tipo hornos estos efectos son mínimos.

El calor radiante para el horno rotatorio esta provisto por quemadores auxiliares estandares de combustible.

El concepto de quemador único, para cualquier flujo en paralelo o a contracorriente, suministra una flama cerca del 20 al 30% de la longitud del horno ver fig. 9^o.

Figura 9. Concepto de un quemador primario



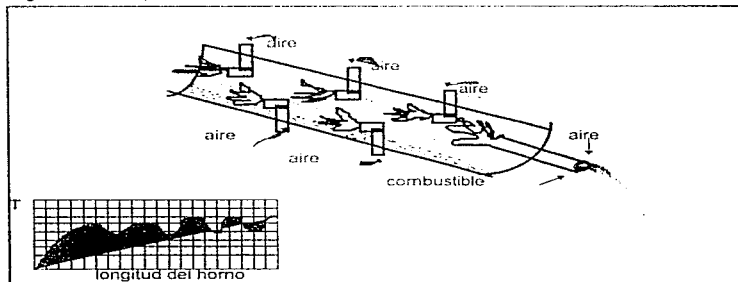
El quemador se puede diseñar para ser móvil, permitiendo así alguna flexibilidad en localizar la zona de quemado donde más se requiera éste. El calor para el 70% restante de la longitud del horno es derivado del calor sensible de los gases calientes.

En ambos casos, el perfil de la temperatura puede ser adelgazado incrementando la relación gas-sólido. La consecuencia asociada por realizar esto es el manejo de grandes cantidades de gas de desecho a altas temperaturas. Esto a su vez incrementa el consumo de combustible, produciendo así un incremento en la caída de presión a través del horno y como resultado, la necesidad de un equipo mayor para el manejo de gas de salida y un aumento en el atrapamiento de partículas.

El concepto de quemador axial incorpora una multiplicidad de quemadores primarios para proveer liberación de calor por casi toda la longitud de el horno. ver fig. 10⁵.

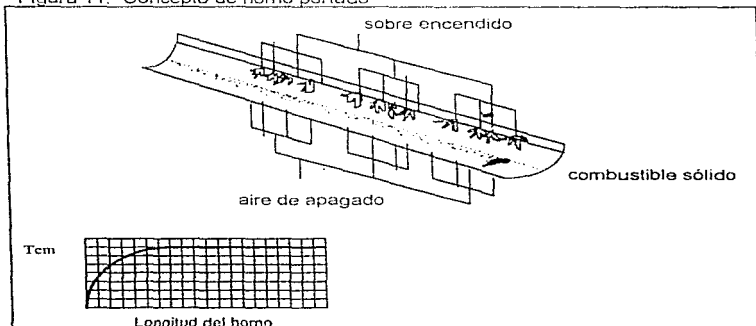
La separación de los quemadores está limitado por consideraciones prácticas para evitar que la flama de un quemador incida sobre el quemador adyacente y lo sobrecaliente.

Figura 10. Esquema de un quemador axial



En hornos de este tipo, la temperatura del gas es errática ya que el aire admitido es calentado y mezclado con el combustible y quemado, entonces se enfrían con los productos de combustión para ceder el calor sensible. El ciclo continúa a todo lo largo del horno, estas temperaturas erráticas pueden causar problemas de control. Si la atmósfera de el horno no cuenta con combustible en exceso para el apoyo de la combustión, los quemadores axiales llegan a requerir de un buen suplemento de combustible auxiliar. El concepto de horno con varias puertas incorpora múltiples entradas de aire que permiten la liberación de calor sobre todo el intervalo completo de la zona activa⁶, ver fig.11. La multiplicidad de puertas proporciona el aire continuo para la combustión. El abanico resultante de flama no tiene discontinuidades y las temperaturas son bien controladas. El momento radial de aire que entra, evita que la porción más caliente de la flama impacte en el refractario. Como un resultado de esto, el perfil de temperatura es fácilmente controlado, el cual suministra una última flexibilidad en la regulación del proceso.

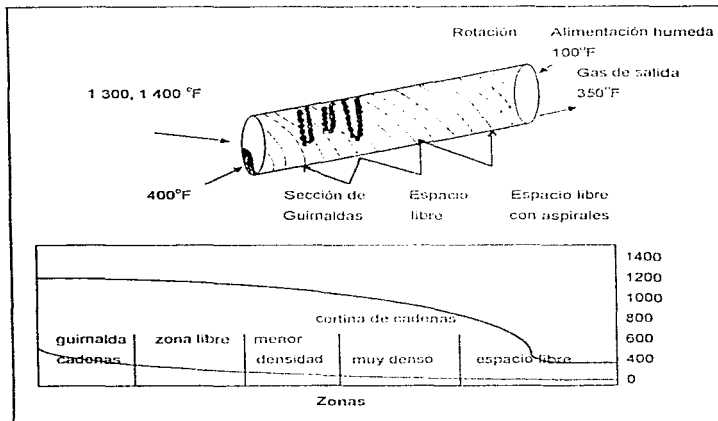
Figura 11. Concepto de horno portado



En operaciones a contracorriente, el uso de cadenas o serie de cadenas en el extremo de la alimentación final de los hornos cuentan con tres funciones: Aumenta la transferencia de calor de una corriente de gas del proceso hacia el material que está siendo procesado, evita la formación de aglomeraciones y/o rompe cualquier aglomeración formada.

Básicamente, se usan dos configuraciones en cadena en los hornos, estas se emplean sobre una longitud grande de éste, estas configuraciones son en guirnaldas y cortinas. La cadena es colgada en ganchos que se aseguran en la coraza del horno, ver fig. 12^o, en el cual se ilustra un arreglo de talos cadenas en el horno. La forma de las cadenas deberán ser construidas dentro de un mecanismo de diseño. Las cadenas del horno añaden peso a la carga total por lo tanto su peso debe ser tomado en cuenta en el diseño mecánico.

Figura 12. Distribución de cadenas en el horno



3.4.5

TIPOS DE INSTALACIONES

Existen dos categorías de instalaciones en plantas para procesar desechos peligrosos, para hornos rotatorios:

Instalación permanente

Instalación móvil

Los hornos de instalaciones permanentes están en los sitios donde se generan los desechos peligrosos o se instalan como facilidades regionales que aceptan desechos de múltiples fuentes. En este tipo de instalaciones los hornos son más grandes y más largos, éstos podrían ser transportados por partes o en secciones y ser soldados en una sola pieza en una zona plana o en algún pavimento especial.

Los hornos de instalación móvil se construyen sobre ruedas para una mayor facilidad de transportación y limpieza, las llantas son de fierro colado ó de fierro forjado, y los rodillos de apoyo sobre los que trabajan dichas llantas son también del mismo material; las chumaceras de las flechas de estos rodillos son del tipo deslizable (cojinetes), normalmente de bronce.

El engranaje de la transmisión principal es normalmente helicoidal, pudiendo también ser recto (sobre todo en los hornos antiguos), la lubricación de éstos es esencialmente del tipo de baño automático y chumaceras de la flecha del piñón de mando son normalmente del tipo anti-fricción (rodamientos)

Se utilizan motores de construcción especial de alto par de arranque; así como reductores de velocidad reforzados, para los mandos de los hornos rotatorios, pudiendo, ser del tipo sencillo o dobles, y con capacidades de hasta 2 000 H.P. todos deben estar equipados con transmisiones auxiliares de emergencia, para poder mantener al horno en actividad en caso de falla de la

corriente eléctrica normal, y para realizar las labores de recuperación del refractario y de mantenimiento general.

Los hornos rotatorios se instalan con cierto grado de inclinación con respecto al eje horizontal (pendiente), se alimentan de la 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, y la alimentación se quéma utilizando quemadores especiales de combustibles (líquido, gaseoso o sólido pulverizado), para luego ser descargada por la parte inferior de dichos hornos.

El nivel de llenado del horno, o porcentaje de carga, puede variar entre 5 y 17% generalmente no hay ninguna regla válida para determinarla adecuadamente, la específica el proveedor del horno.

El quemador de combustible de los hornos va montado sobre una carátula móvil que adsorbe la expansión de los mismos, y que permite su posicionamiento conforme al criterio del operador.

Los extremos de los hornos deben estar equipados con eficientes mecanismos de sellado de entradas de aire, para que no se afecte la operación económica de los mismos.

Así mismo, el recubrimiento refractario interior de los hornos debe ser de la mejor calidad posible, tanto por lo que se refiere a la fabricación, como a la instalación del mismo.

Un horno rotatorio normal, que no este conectado a ninguna clase de sistema recuperador de calor, puede dividirse en las siguientes zonas de procesado²³:

1. ZONA DE SECADO. 33% de la longitud total del horno. La temperatura del material alcanza casi 120°C (248 °F). Eliminación de humedad (Proceso húmedo)
2. ZONA DE PRECALENTAMIENTO. 14% de la longitud total del horno. La temperatura del material sube de 100 a 550°C (212 a 1 022°F).

Desprendimiento de agua de combinación 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 (1 022 a 2012°F). Disociación de carbonato de magnesio.

4. ZONA DE SINTERIZACIÓN (ZONA DE QUEMADO) 20% de la longitud total del horno. La temperatura del material sube de 1 100 a 1 450°C (2 012 a 2 642°F). Disociación de carbonato de calcio.

5. ZONA DE ENFRIAMIENTO. 5% de la longitud total del horno. La temperatura del material baja de 1 450 a 1 370°C (2 642 a 2 498°F). Combinación de la cal con los minerales arcillosos, esto es, formación de los cuatro minerales principales de clinker.

Un horno rotatorio basado en el sistema de incineración se muestra en la fig.13⁶.

El volumen de material a procesar y el tipo de instalación podría definir el tamaño del equipo. El horno rotatorio podría volatilizar los constituyentes peligrosos, que entonces podrían ser quemados en la corriente de gas en el horno. Una cámara de postcombustión, equipada con quemadores independientes y ventiladores, asegura una completa destrucción de los constituyentes peligrosos. Una chimenea de alivio localizada corriente abajo de la cámara de postcombustión deberá proporcionar los medios para arrojar los gases de proceso si el intercambiador de calor no funciona.

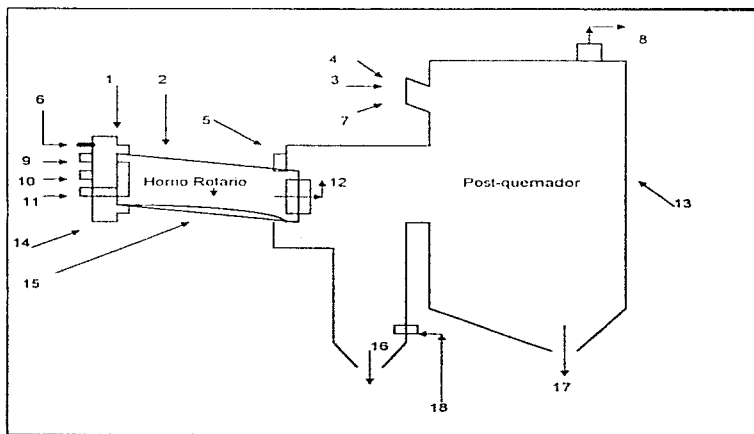
El intercambiador de calor (calor de desecho - calor de la caldera, de un extinguidor, u otro tipo de sistema), reduce la temperatura del gas de salida para proteger el colector de partículas. El ventilador de flujo inducido proporciona la corriente de gas de proceso al sistema de control, arrojando así los gases limpios a la atmósfera.

Mientras que los sólidos incinerados son llevados a un enfriador humidificador en donde este material es enfriado.

Un enfriador rotativo proporciona un mecanismo inverso de transferencia de calor inverso que se describe para el horno, un enfriamiento adicional se adiciona para veneficiar la humedad que puede ser llevada a cabo si adicionamos rociadores de agua a los enfriadores. El material se descarga a una temperatura menor de 65°C (150°F) para un posterior manejo por medio de un transportador de banda:

La incineración de desechos peligrosos en los hornos rotativos ha llegado a ser popular porque están bien establecidos los diseños, los conceptos y teorías y que ya han sido probados en muchas industrias de procesos de sólidos.

Figura 13. Esquema de un horno rotatorio.



- 1.- Sellador rotativo
- 2.- Refractario
- 3.-Combustible auxiliar
- 4.-Residuos líquidos
- 5.- Aire de combustión
- 6.-Sellador rotativo
- 7.-Aire
- 8.-Descarga a enfriamiento o recuperación de calor
- 9.-Residuos líquidos
- 10.-Combustible auxiliar
- 11.-Residuos sólidos, contenedores o lodos
- 12.-Gases calientes
- 13.-Refractario
- 14.-Aire de refuerzo al horno
- 15.-Plano de inclinación
- 16.-Cenizas
- 17.-Cenizas
- 18.-Combustible auxiliar

3.5 SUBPRODUCTOS GENERADOS POR LA INCINERACIÓN

De la combustión, se generan dos productos residuales: gases y sólidos en forma de ceniza. Los gases de la combustión están compuestos principalmente de dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), de pequeñas cantidades de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), y de otros gases que dependen de la composición de los residuos. La ceniza es un material inorgánico inerte que está hecho de carbón, sales y metales, su exacta composición, como la de los gases, depende del tipo de residuo a incinerar. Durante la combustión, la mayoría de la ceniza se colecta en el fondo de la cámara de combustión, sin embargo, una fracción de ella es llevada junto con los gases en forma de pequeñas partículas. Diferentes tipos de residuos producen diferentes tipos y cantidades de ceniza⁴, la incineración de líquidos produce normalmente muy pequeñas cantidades de ceniza. La incineración de residuos sólidos, produce mayores cantidades de ceniza, normalmente del 10 al 30 por ciento de la cantidad original del residuo.

La ceniza es separada o removida desde el fondo de la cámara de combustión y, en ocasiones, puede contener elementos peligrosos.

Los gases se mueven a través de varios dispositivos que enfrían y limpian los gases antes de que sean liberados a la atmósfera, a través de la chimenea del incinerador.

Normalmente se emplean ventiladores para mantener el flujo de gases a través del sistema. Los implementos o equipos para el control de la contaminación atmosférica se utilizan para eliminar las partículas y algunos gases producto de la combustión. Los tipos de implementos y equipos empleados, dependerá del incinerador y de los tipos de residuos a incinerar. Por ejemplo, el ácido clorhídrico (HCl), es creado por la combustión de desechos que contienen compuestos orgánicos clorados.

Si en el incinerador no se queman materiales orgánicos clorados, no será determinante contar con un dispositivo especial para remover el ácido clorhídrico.

Un incinerador con un buen diseño, puede destruir cualquier tipo de material, incluyendo los compuestos orgánicos contenidos en los residuos.

Estos incineradores operan herméticamente cerrados para complementar la combustión (La total destrucción de todos los compuestos orgánicos)

La combustión completa es sólo un concepto teórico; sin embargo desde el punto de vista real de funcionamiento, lograr un 100% de eficiencia en un incinerador, no es posible.

El tipo y cantidad de compuestos emitidos, depende de la composición de los residuos, de la completa seguridad del proceso de combustión y del equipo para el control de la contaminación del aire. Tales compuestos, se pueden clasificar de la siguiente manera⁵:

a). Compuestos orgánicos derivados del residuo original.

Los compuestos orgánicos que no son llevados a través de los gases generados en la cámara de combustión. Estos gases orgánicos no quemados son removidos por el equipo de control de la contaminación en la parte final del incinerador.

b). Compuestos inorgánicos derivados del residuo original.

Los compuestos inorgánicos, tales como sales y metales no combustibles, terminan en el fondo de la cámara de combustión incorporadas en las cenizas o en los gases de la combustión, dependiendo principalmente de su peso.

c). Compuestos orgánicos no presentes en los residuos peligrosos.

Estos compuestos, que son llamados productos de la combustión incompleta, se forman durante la combustión de cualquier material orgánico, considerados tóxicos, incluyendo las dioxinas y los dibenzofuranos.

En los incineradores modernos la formación de productos típicos de una combustión incompleta, se minimiza al mantener los productos al inicio de la combustión a altas temperaturas y por un lapso de tiempo apropiado.

Los productos de una combustión incompleta son destruidos por la alta temperatura mantenida en la zona de combustión o en la cámara de combustión secundaria.

d). Compuestos inorgánicos no presentes en el residuos original.-

Además del bióxido de carbono y agua, la combustión produce pequeñas cantidades de monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x), (De la combinación de oxígeno (O₂),y nitrógeno (N₂) en el aire).

La combustión de estos compuestos producen ácido clorhídrico, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno respectivamente.

3.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DESTRUCCIÓN TÉRMICA

Ventajas⁵

- ⇒ Efectivos a una variedad de contaminantes. Pueden incinerar una gran variedad de residuos (líquidos, sólidos y todos), independientemente o combinados.
- ⇒ Pueden alcanzar alta eficiencia de remoción, hasta de 99.99% ó más.
- ⇒ Calor y gases posibles de recuperar.
- ⇒ Destrucción de contaminantes con producción de productos terminales primarios CO₂ y H₂O. Sin embargo los gases ácidos son también productos terminales; cuando los residuos son halogenados, sulfonados, nitrados o contienen compuestos de fósforo.
- ⇒ Generalmente capaces de reunir los requerimientos de la disposición final, ya que los productos terminales de la incineración (gases y cenizas) están en la mayoría de los casos estabilizados.
Reduce el volumen de residuos, sobre todo cuando los residuos contienen altas concentraciones de orgánicos.
- ⇒ En algunos procesos se puede recobrar el valor económico de los residuos. Como es el caso del tratamiento de los residuos tratados por un horno de plasma, es posible reciclar metales como: titanio, aluminio, metales preciosos, zinc, níquel, etc.

Desventajas

- ⇒ Un contenido alto de humedad puede afectar los requerimientos de energía.
- ⇒ Elevados niveles de compuestos orgánicos halogenados pueden generar gases ácidos que pueden atacar material refractario y/o impactar las emisiones a la atmósfera.
- ⇒ Los metales tóxicos puros o como óxidos, hidróxidos o sales que se volatilizan a altas temperaturas (como cadmio, arsénico, mercurio, plomo, estaño y plata) pueden vaporizar durante la incineración y son difíciles de remover usando el equipo de control convencional. Adicionalmente, elementos como el cromo trivalente puede ser oxidado a un estado de valencia más tóxico en sistemas de combustión con atmósferas oxidantes.
- ⇒ El tratamiento térmico de compuestos orgánicos fosforados, pueden formar ácido fosfórico anhídrido, el cual contribuye al ataque refractario y causa problemas de escoria.
- ⇒ Altas eficiencias de remoción son requeridos para BPCs y dioxinas.
- ⇒ Tratamiento térmico de residuos que contengan metales pesados pueden generar concentraciones altas de metales solubles y/o totales en los productos finales. Por ello los productos finales de los residuos del tratamiento pueden ser peligrosos.
- ⇒ El tratamiento térmico de residuos clorados o sulfonados requiere sorción o absorción de gases ácidos.

3.7 SITUACION ACTUAL

Algunos Países cuentan con plantas de incineración muy pequeñas y en muchos casos anticuadas. Tal es la situación de: Francia, España, Italia y Gran Bretaña.

Esto es, debido a los nuevos y estrictos requisitos para la protección del medio ambiente, dichas plantas deberán ser remplazadas por plantas nuevas en un futuro próximo.

Probablemente el cumplimiento de los nuevos requisitos resulten demasiado costosos para unidades pequeñas nuevas. La solución óptima quizá sea la instalación de plantas regionales, podría entonces esperarse una evolución con tendencia a plantas de mayor tamaño, y mayores posibilidades de ofrecer soluciones a un costo más accesible y favorable desde el punto de vista del ambiente.

El tipo de combustión empleado con más frecuencia en la incineración de residuos, es el de combustión en masa, y se prevé que ésta será la situación también en el futuro próximo, al seleccionarse estos en su origen y al hacerse los combustibles derivados de residuos más homogéneos y de mayor calidad. La calidad superior de los combustibles, ofrecerá también nuevas posibilidades de soluciones combinadas con diversos combustibles sólidos.

La recuperación de energía en incineradores de residuos, se aplica de forma creciente a la producción de electricidad, vapor y agua caliente. El tipo de producción depende de la situación del mercado. A nivel mundial, la producción predominante es la de energía eléctrica, probablemente debido a la relativa estabilidad de los mercados. En Suecia, Dinamarca y otros Países, la energía se emplea normalmente para calefacción.

Los incineradores de residuos, son plantas de recuperación de recursos, comparables a otras unidades de producción de energía. La producción simultánea de electricidad y vapor o agua caliente, constituiría una alternativa interesante para gran número de plantas.

En lo que se refiere a la normatividad sobre emisiones, Alemania en un principio prestó especial atención a ácidos como HCl, HF y SO₂, mientras que Suecia se señaló a los metales pesados, especialmente el mercurio y las dioxinas como elementos más importantes.

Actualmente, varios Países han adoptado los requisitos suecos relativos a dichos contaminantes.

En México se está aceptando, el hecho de utilizar residuos peligrosos formulados, con características que cumplan la aprobación de un combustible secundario para ser empleados en hornos rotatorios de plantas cementeras.

3.8 ESTIMACIÓN DE COSTOS

No existen ideas claras, desde el punto de vista económico, sobre la incineración de los residuos líquidos como método de eliminación. Por desgracia, esto depende en gran medida del costo de los métodos alternativos. Una situación extrema sería la que representa un disolvente completamente combustible que se le puede incinerar en un quemador convencional y recuperar el calor que se produce en una caldera, también convencional, mediante la generación de agua caliente o vapor. En este caso la utilización del combustible alterno prácticamente eliminará el combustible tradicional que se utiliza o se necesita para producir el vapor en la planta lo que traería como beneficio una reducción significativa de costos.

Dada la información disponible, no es posible consignar en este documento las capacidades y volúmenes de operación de cada una de estas empresas, que utilizan solventes como combustibles residuales.

En la tabla número 20 se hace una descripción de la disposición y costos de estos residuos⁴⁵, por ejemplo en esta tabla se ve que cuando se selecciona el confinamiento se han realizado inversiones de 41 Millones de Dolares que han logrado generar 1 200 empleos, también se puede ver que en esta tabla existe una comparación entre los diferentes tipos de disposición final como es la formulación de combustibles y reciclaje de energéticos, y cual sería el costo de cada uno de estos, ver tabla 20.

Tabla 20. Costos de inversión por tipo de actividad

ACTIVIDAD	INVERSIONES REALIZADAS (Millones de Dólares)	EMPLEOS GENERADOS (Directos y Complementarios)
Confinamiento	41	1 600
Reciclaje de solventes y aceites	21	2 800
Formulación de combustibles y reciclaje de energéticos	33	2 700
Reciclaje de residuos y materiales metálicos	20	1800
Total	115	8 900

FUENTE: Información proporcionada por empresas prestadas de servicios en México

Los actuales costos operativos en el mercado nacional para las principales actividades de manejo de residuos peligrosos, se comparan con los que se representan en los E.E.U.U.A., los cuales se encuentran descritos en la tabla 21, esta nos señala que para los diferentes tipos de tratamientos la diferencia en el intervalo de costos es mucho menor en México que en los E.E.U.U.A.⁴⁶, también esta tabla indica que el costo de reciclaje energético es menor que el confinamiento, en ciertos casos menor que el reciclaje y la recuperación que tiene un intervalo muy amplio que llega a más de 120 dólares / tonelada.

Esto es resultado de una demanda muy debil en México, ya que los costos de capital y operación son en principio muy similares entre los dos países. Sin duda, tal desfase limita la rentabilidad en las nuevas inversiones en un mercado que debe consolidarse y contar con mecanismos eficientes de inspección y vigilancia.

Tabla 21. Costos por actividad referente para la ciudad de México así como para E.U.

Actividad	Costos de manejo (dolares / toneladas)	
	México	E.U.
Confinamiento		
• Tambos	70 - 100	245 - 350
• Granel	45 - 60	84 - 140
Oxidación térmica	No se cuenta con este dato	560 - 1 190
Reciclaje energético		
• Líquidos limpios comb.	10 - 30	14 - 84
• Líquidos en general incluyendo solventes	25 - 40	84 - 350
Reciclaje y recuperación	25 - 120	105 - 420
Tratamientos físico - químicos		
• Neutralización, ácidos y bases	15 - 50	35 - 140
• Cianuros y metales pesados	200 - 250	105 - 1 120
Transporte	0.03 (ton / km)	0.14 (ton / km)

Información proporcionada por diez de las principales empresas dedicadas a la prestación de servicios en E.E.U.U. A. (AMCRESPEC - 1990)⁴³

Como se puede observar, la tabla 21 nos muestra una comparación de costos entre México y E.E.U.U.A. con respecto al tratamiento de los residuos peligrosos.

En la tabla 22, se dan los costos que origina la incineración por Kg de residuos en un incinerador de lecho fijo, para diferentes capacidades⁴⁹.

Esta tabla también nos señala, cuales son los diferentes materiales que se emplean en el mantenimiento de estas unidades, así como los servicios requeridos de agua y de personal que operan éste tipo de plantas.

Los costos en un horno rotatorio es siete veces mayor para estos mismos servicios.

Esta información fué proporcionada por la empresa Incineradora de Residuos Sólidos, S.A. de C.V., (INRESOL), la cual se dedica al diseño en la construcción de incineradores para ciertos tipos de residuos peligrosos.

Tabla 22. Costos de incineración por kilogramo de residuos

COSTOS DIARIOS DE OPERACIÓN	INC-15 I/C \$/Kg	INC-30 I/C \$/Kg	INC-60 I/C \$/Kg	INC-120 I/C \$/Kg	INC-160 I/C \$/Kg	INC-190 I/C \$/Kg	INC-350 I/C \$/Kg	INC-550 I/C \$/Kg
<u>MATERIALES</u>								
CAL Y CARBON ACTIVO:	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14
JABON LÍQUIDO	0.20	0.19	0.18	0.18	0.17	0.17	0.14	0.12
RASTRILLEROS	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
TRATAMIENTO DE AGUA	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14
GRASA Y ESTOPA	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
SUMA	0.56	0.54	0.53	0.53	0.52	0.52	0.47	0.45
<u>SERVICIOS</u>								
AGUA	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
GAS	0.20	0.31	0.31	0.31	0.34	0.34	0.35	0.36
CORRIENTE ELECTRICA	0.08	0.14	0.13	0.13	0.13	0.14	0.16	0.16
DRENAJE	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
SUMA	0.31	0.49	0.48	0.48	0.51	0.52	0.55	0.56
<u>PERSONAL</u>								
No. DE OPERADORES	1 Persona	1 persona	1 Persona	1 Persona	1 Persona	1 Persona	1 Persona	1 Persona
TIEMPO DE OPERACIÓN	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable
COSTO DIRECTO DE MANO DE OBRA	0.67	0.54	0.51	0.51	0.43	0.41	0.36	0.55
EQUIPO DE PROTECCIÓN Y SEGURIDAD PERSONAL	0.15	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11
SUMA	0.82	0.66	0.63	0.63	0.54	0.52	0.47	0.66

Información: Incineradora de residuos peligrosos sólidos, S.A de C.V., (INRESOL) 1997, Calle Clavel No. 60 Girasol-04, San Bernardino

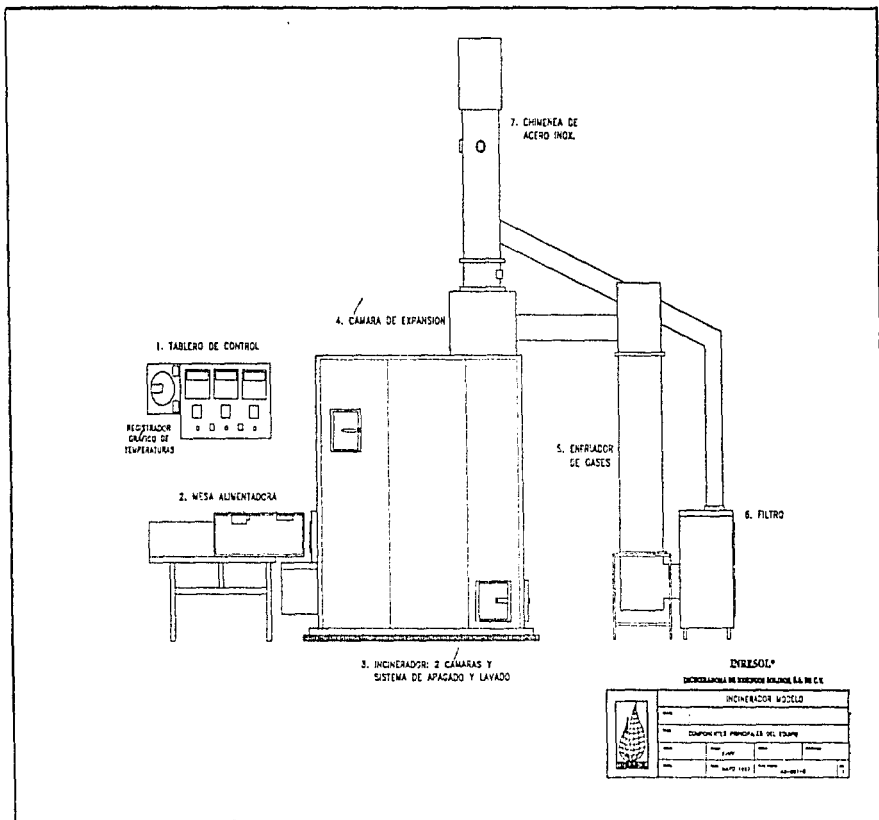


Figura 14. Insineradora de Residuos Peligrosos

CAPÍTULO 4
RIESGOS ASOCIADOS A LOS PROCESOS
TÉRMICOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS
RESIDUOS

4 RIESGOS ASOCIADOS A LOS PROCESOS TÉRMICOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS

INTRODUCCIÓN

El tratamiento térmico de residuos peligrosos, tal como otras operaciones industriales no esta exento de riesgos, algunos riesgos se encuentran asociados con el equipo de tratamiento mismo (riesgos mecánicos), otros están relacionados con la operación (riesgos operacionales), así como los riesgos de transporte y de almacenamiento de los residuos peligrosos.

En ciertas metodologías, se requiere de un formato específico para examinar los riesgos asociados a las actividades inherentes con el tratamiento de los residuos en general, así como para manejar los estándares desarrollados para la protección de la salud humana y el ambiente. Específicamente, para los riesgos asociados con el tratamiento térmico de residuos peligrosos, las metodologías de evaluación han sido desarrollados por la US-EPA y otros organismos afines.

4.1 RIESGOS POTENCIALES DE LOS PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS

A continuación se describen las actividades específicas, que se consideran como referencia para determinar las categorías de riesgo en cada una de las instalaciones que conforman una instalación para el tratamiento de los residuos mediante la aplicación de los procesos térmicos.

4.1.1 RIESGOS POR TOXICIDAD

Se puede presentar un riesgo ambiental por escape de gases y vapores a la atmósfera en caso de que llegaran a ocurrir los siguientes eventos⁶:

- a). **Emisión de vapores de solventes volátiles de alta capacidad calorífica, en caso de un derrame en un tanque de almacenamiento (por ejemplo a un dique de contención), o en caso de fuga del sistema de alimentación al tratamiento térmico.**
- b). **Combustión descontrolada e incompleta de solventes u otros residuos tóxicos debido a la apertura del dispositivo de relevo del sistema térmico.**
- c). **Fuga de mezcla de gases, de sustancias altamente riesgosas.**
- d). **Falla en el sistema de lavado de gases, incluyendo dispositivos de seguridad e instrumentación.**
- e). **Falla en el sistema de control de contaminación, que ocasionaría la emisión de sustancias tóxicas de dos tipos:**
 - **Residuo no quemado**
 - **Gases tóxicos, generando dioxinas, furanos y otros compuestos tóxicos.**

Los riesgos mencionados, se han venido reduciendo conforme han mejorado las tecnologías de control, seguridad e instrumentación, tales como:

- **Sistemas de lavado de gases.**
- **Sistema de Scrubbers.**

- **Sistemas analizadores de gases, tales como: Cromatografos de gases y Espectrofotómetros.**
- **Ciclones.**
- **Sistemas de filtración.**
- **Sistemas de relevo.**
- **Sistemas de intercambio de calor.**

4.1.2 RIESGO POR FUEGO Y EXPLOSIÓN

La posibilidad de fuego y explosión es un inicio importantísimo a considerar, en las industrias que manejan sustancias inflamables y explosivas para el caso de sistemas de destrucción térmica, que requieren del uso de combustibles, también existe la posibilidad de ocurrencia de este tipo de eventos, tanto en su almacenamiento como durante su transporte, e incluso en la fase operativa.

Cabe aclarar que cualquier industria que maneja sustancias peligrosas, en los incineradores se hace patente; sin embargo la probabilidad de ocurrencia de este tipo de accidentes en una industria química, es mucho más alta.

Estos riesgos se reducen, en la medida que se mejoren los mecanismos de control y se instruyen dispositivos de seguridad en los equipos (arrestadores de flama, válvulas de alivio, válvulas de seguridad, sistemas de control computarizado, detectores de flama del quemador, interruptor de disposición del quemador, control de presión del combustible, control de presión de aire, control de análisis de gases, sistema de absorción, etc.).

- **Mezcla explosiva en el hogar del incinerador⁵. La probabilidad de ocurrencia de este evento, esta supeditada a la falla del sistema de inyección de aire al**

quemador, así como a la falla de la instrumentación y de los dispositivos de seguridad.

- Inyección de solventes antes de finalizar la etapa de precalentamiento.
- Almacenamiento de residuos peligrosos con esta última característica.

El riesgo por incendio puede ocasionarse por el manejo de materiales inflamables, pudiendo ocasionar también afectación en sus alrededores por radiación térmica y nubes inflamables.

4.2 EMISIONES DE LA INCINERACIÓN Y TECNOLOGÍAS PARA LA LIMPIEZA DEL GAS

Una combustión absolutamente limpia produciría un gas de chimenea con sólo CO_2 y H_2O , junto con el aire en exceso. Dado que el sólido a incinerar normalmente contiene muchos productos químicos diferentes del C, H y O, también se producen los siguientes contaminantes:

Gases ácidos: HCl, HF, SO_2 , NO_x .

Metales pesados volatilizados: Hg, Cd, As, Pb, etc.

Partículas sólidas, polvos o aerosoles en suspensión.

Compuestos o microcontaminantes orgánicos de diferentes tipos:

Dioxinas (PCDD) y furanos (PCDF).

Poliaromáticos (PAH).

Compuestos orgánicos volátiles (VOC, COV o PIC).

Alquitranes

Compuestos orgánicos clorados, etc.

4.2.1 TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES DE LIMPIEZA DEL GAS PROVENIENTE DEL INCINERADOR

Para eliminar los contaminantes anteriormente mencionados presentes en el gas de salida, se dispone de una serie de tecnologías que se podrían llamar convencionales por estar bastante bien establecidas. Todas ellas se basan en un procesado posterior del gas de salida del incinerador. Dependiendo del método o del tipo de las fases existentes en dicho procesado o de los aparatos para la limpieza del gas, se distinguen varios sistemas de depuración: húmedo, semiseco y seco.

4.2.2 MÉTODO HÚMEDO

También llamado lavado húmedo, está precedido de una unidad de eliminación de partículas de polvo, ya sea con filtros de manga o con precipitadores electrostáticos. El lavado se efectúa con soluciones acuosas neutralizantes (generalmente de hidróxidos de calcio o de sodio) de los gases ácidos y suele ser eficiente en la condensación de los vapores de mercurio³⁷.

Cuenta con un intercambiador de calor para enfriar aún más los gases condensando así el vapor de agua. El sistema permite remover un 95% de HCl y un 90% de SO₂. Se recomienda su empleo cuando el control del SO₂ se complica debido al exceso de HCl y HF que se pueden eliminar fácilmente con este sistema.

El método húmedo permite alcanzar menores niveles de emisión, para gases ácidos, que los métodos seco y semiseco, pero, a su vez, es menos eficaz en la eliminación de VOCs, dioxinas y partículas de polvo. El sistema resulta económico, aunque tiene el inconveniente posterior de la inevitable depuración de las aguas contaminadas producidas.

4.2.3 MÉTODO SECO

Se rocía cal seca pulverizada o hidratada sobre los gases de combustión en un reactor o cámara de mezcla o se pulveriza en los mismos conductos de salida.

Los gases ácidos reaccionan con la cal y el producto se recoge en la unidad de eliminación de sólidos. Actualmente, se prefiere que esta unidad sea de filtros de manga antes que de precipitadores electrostáticos, ya que la torta depositada sobre el filtro sigue actuando químicamente sobre los gases que la atraviesan³⁸.

Las cenizas volantes producidas en la incineración se les separa del gas en el mismo filtro. El proceso es más eficaz cuando la temperatura de los gases es baja, por lo que la recuperación de calor se ha de hacer antes del reactor. El producto residual es completamente seco, y con reactivos apropiados se le puede hacer

químicamente estable, lo que facilita su posterior eliminación. El método tiene la ventaja de usar sólidos de fácil manipulación, pero presenta el inconveniente de requerir un alto consumo de absorbentes (2.5 a 5 de la relación estequiométrica).

4.2.4 SISTEMA SEMISECO

Se desarrolló para la desulfuración de plantas de combustión de carbón. Con algunas modificaciones, se ha adaptado muy bien a la incineración de residuos sólidos. El sistema es similar al seco, pero la diferencia radica en que el reactivo se inyecta en forma de lechada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), por lo que no es necesaria otra etapa de enfriamiento. El producto de desecho también es un polvo seco del que se ha evaporado el agua, sólido que es recogido en los filtros de manga.

Las tecnologías citadas "Convencionales", permiten eliminaciones de un 90% por término medio de los contaminantes ácidos, polvos y metales pesados³⁹.

Las bajas temperaturas a las que actúan los "neutralizadores" de los gases de salida (unos 200 °C) y la composición química de los sólidos utilizados, CaO o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mayoritariamente, no son suficientes o adecuados para destruir las trazas de PCDD (Dioxinas), PCDF (Furanos), VOCs (Compuestos orgánicos volátiles), PAHs (Poliaromaticos), alquitranes, etc.

Un cierto porcentaje de estos contaminantes quedan adsorbidos y absorbidos en la lechada de cal, pero el resto (elevado) sale en los humos o gases de salida. Por ello, se empieza a hacer uso de nuevas o más avanzadas tecnologías.

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Un residuo peligroso puede estar constituido por las materias primas que entraron al proceso de producción, materias generadas como subproductos de este, o materiales que no provienen del proceso productivo mismo si no que son generados en otros lugares de la empresa. Es por ello que es necesario contar con las tecnologías adecuadas que modifiquen las propiedades tóxicas de los residuos; o bien que permitan su reutilización en otros procesos.

Para solucionar y prevenir el impacto de los residuos peligrosos se presentan los siguientes puntos:

1. Desarrollar y aplicar procesos industriales que no generen residuos peligrosos o que sean generados en cantidades mínimas.
2. Desarrollar tecnologías y/o técnicas que incorporen o reciclen los residuos peligrosos al mismo proceso o incorporararlos como materia prima a otro tipo de procesos.
3. Mezclar los residuos peligrosos para producir combustibles suplementarios.
4. Procesar los residuos peligrosos mediante diferentes tecnologías con la finalidad de reducirlos.
5. Destruir, minimizar y/o hacerlos menos peligrosos por medio de la incineración.

Dentro del campo de la generación de los residuos peligrosos se encuentran los solventes residuales, los cuales llegan a tener un valor calorífico ideal para formar un combustible suplementario.

Los disolventes son líquidos que facilitan la disolución de otras sustancias para diferentes fines como son: El proceso de purificación de un producto y la disolución de grasas, entre otras actividades, y al ser desechados estos disolventes se encuentran contaminados con las sustancias disueltas en él, caracterizándose de esta manera como un residuo peligroso.

Dentro de las estrategias de el manejo de los residuos peligrosos deberán privilegiarse aquellas orientadas a la minimización en su generación o reciclaje.

Ambas alternativas constituyen una fuente de ahorro de recursos.

Debido a sus propiedades físicas y químicas de los solventes residuales, éstos pueden ser utilizados como combustibles alternos en un horno de cemento, que presenta características ideales que permiten el uso de combustibles suplementarios.

Es así que, la combustión de residuos orgánicos en hornos de cementos constituye una alternativa para el correcto manejo de muchos de estos residuos, teniendo así dos funciones primordiales:

1. Ahorrar energía mediante la reducción en el consumo de combustibles derivados del petróleo.
2. Destruir térmicamente los residuos orgánicos que se utilicen como combustibles alternos.

Estos combustibles alternos deberán contar con ciertas características específicas, para ser utilizados en un horno rotatorio. La SEMARNAP ha especificado que estos combustibles suplementarios deberán cumplir con los siguientes puntos:

Poder calorífico	Superior a 5 500 Kcal/Kg.
Total de halógenos	Menor a 1% en peso
Contenido máximo de S	1% en peso
Sólidos en suspensión	30% Máximo
Agua libre	5% Máximo
Viscosidad	Bombeable
BPC's/Plaguicidas	Menor a 2 ppm

Metales	Máximo ppm
Arsénico	100
Bario	6 000
Cadmio	500
Cromo	2 000
Plomo	6 000
Mercurio	1
Selenio	100
Plata	1 000

Contenido total de metales 1.48% máximo.

Los combustibles alternos son una mezcla balanceada y homogénea de diversos residuos que provienen de una gran variedad de fuentes. Una vez mezclados los residuos estos contienen un valor calorífico que permite la sustitución de combustibles primarios tales como el combustóleo, gas o carbón, de esta manera se logra la recuperación de recursos y la destrucción total de los residuos mediante un proceso térmico.

Los residuos ideales para quemar en hornos rotatorios son los aceites minerales, y los solventes orgánicos no clorados. Sin embargo, debido al enorme consumo de combustible que demandan los hornos rotatorios, y a la variedad de características de los residuos, para poder garantizar un combustible altemo adecuado, se requiere formularlo mezclando varios residuos, siendo así una mezcla balanceada y homogénea de diversos residuos que provienen de una gran variedad de fuentes. Una vez mezclados los residuos estos contienen un valor calorífico que permite la sustitución de los combustibles primarios por combustibles secundarios.

El proceso de formulación de combustibles alternos mediante el mezclado de residuos, además de proveer al horno de un combustible óptimo en cuanto a sus

especificaciones, amplía enormemente las posibilidades de destrucción térmica de muchos residuos que por sí solos, no podrían quemarse en un horno rotatorio.

Este es el caso de los materiales clorados, hidrogenados o también de aquellos que no contienen un calor de combustión elevado.

Para ello uno de los sistemas térmicos de incineración con la que se cuenta actualmente en México son los hornos rotatorios de las cementeras, para ello la destrucción térmica de muchos de estos residuos empleandolos como combustibles alternos en estos hornos, podría significar una alternativa estratégica de solución. Por su parte la viabilidad de su aplicación está íntimamente relacionada con el hecho de que México es el décimo productor de cemento a nivel mundial y que cuenta con 36 plantas cementeras distribuidas en prácticamente la totalidad del territorio nacional.

La sustitución de combustóleo por combustibles alternos en hornos de cemento, es un proyecto rentable a largo plazo, dicha rentabilidad es mayor en la medida en que el combustible alterno como insumo del horno tiene un menor costo.

Como se puede notar la tecnología de incineración está disponible para destruir desechos de diversas clases y en ciertas cantidades siempre y cuando estos desechos cumplan con los puntos mencionados anteriormente.

La incineración es la más conveniente para destruir de un modo limpio la mayor parte de los residuos de producción y parece que sólo es recomendable la utilización de aparatos de recuperación de calor cuando la cantidad de calor recuperable o el costo del equipo estén justificados desde el punto de vista económico.

CAPÍTULO 6
BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1).- Reunión Anual del Programa Universitario del Medio Ambiente (1994).
Memorias. Vol.1 y Vol.2. UNAM.
- 2).-CORTINAS C. (1994). Regulación y Gestión de Productos Químicos en México.
Enmarcados en el Contexto Internacional. Secretaría de Desarrollo Social y
Instituto Nacional de Ecología.
- 3).-BRETON M. (1988). Treatment Technologies for Solvents Containing
Wastes. Noyes Data Corporation. USA.
- 4).-WILK L., PALMER S. Y BRETON M. (1988). Corrosive Containing Wastes.
Noyes Data Corporation. USA.
- 5).-INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. (1995). Seminario Sobre Procesos
Térmicos para Tratamiento de Residuos.
- 6).- HARRY M. F. (1993). Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment
and Disposal. Editor in Chief. Edit. Mc. Graw Hill Book Company Capitulo
6,7 y 8.
- 7).- PLUNKETT E. R. (1976). Manual de Toxicología Industrial. Ediciones
URMO.
- 8).-LUND H. F. (1971). Manual para el Control de la Contaminación Industrial.
Edit. Mc. Graw Hill. Book Company.

- 9).-CORTINAS C., JUAREZ P. C., SERRANO G. R. Y ORDAZ G. Y. (1994).
Prevención y Preparación de la Respuesta en Caso de Accidentes
Químicos en México y en el Mundo. Instituto Nacional de Ecología.
SEDESOL. Serie Monografica No. 5.
- 10).-CAREAGA J. A. (1994). Manejo y Reciclaje de los Residuos de Envases y
Embalajes. Instituto Nacional de Ecología. SEDESOL.
Serie Monografica No. 4.
- 11).- MARSDEN B.S. (1966) Solvents Guide. Distillers Co. Ltd. Chemical
Second Ed. N.Y.
- 12).-RAKOFF H. ROSE C. N. (1975). Química Orgánica Fundamental. Edit.
Limusa. México D.F.
- 13).- BAEZ P. A. (1997). Comunicación personal.
- 14).- INCINERABLE HAZARDOUS WASTE MINIMIZATION. (1991).
Workshops. The California Department of Health Services. Toxic.
Substances Control Program. Alternative technology. Berkeley. Ca.
- 15).-NELSON L. N. (1971). Liquid Wastes of Industry. Edit. Addison Wesley.
- 16.- CONFERENCIA DE RESIDUOS PELIGROSOS. (1995). INE (Instituto
Nacional de Ecología).
- 17).- HUISINGH D. (1985). Profits of Pollution Prevention: A Compendium of
North Carolina Case Studies. Arthur D. Little. Inc. Cambridge. Mass.

- 18).- **DILLON A.P.** (1981). Hazardous Waste Incineration Engineering. Pollution Technology. Review No.88. Noyes Data Corporation. Park Ridge. N.J. Cap 2.
- 19).- **IBID.** Cap.4. Pag.94
- 20).- **U.S. BUREAU OF MINES.** (1977). Technical paper No. 384. U.S. Department of the interior.
- 21).- **PIERCE R.** Computer Simulation of Solids Flow in Heavily Loaded Rotatory Kilns. Allis Chalmers Publication 22B 10880.
- 22).- **VRABLE D.A. Y ENGLER D.R.** (1966) Transportable Circulating Bed Combustor (CBC) for the Incineration of Hazarduos Waste. Haz pro '6. Baltimore, Maryland. April 1-3.
- 23).- **KUNI Y LEVENSPIEL.** (1977). Fluidization engineering. Robert F. Krieger Publishing Ed. N.Y.
- 24).- **ZEN F. A. Y OTHOMER D.F.** (1977) , Fluidization and Fluid Particle Systems. Edit.Reinhold New York.
- 25).- **HOWARD J. R.** (1983). Fluidized Beds. Combustion and Applications. Applied Science Publishers.
- 26).- **LIAO P.B.,** (1974). "Fluidized Bed Sludge Incinerator Design". Journal WPCF. 48:8, 1899 a 1913.
- 27).- **RUBEL F.** (1974). lincineration of Solid Waste. Noyes data corp. N.Y

- 28).- RASMUSSEN G.P. Y MCFEE J.N. (1983). Fluidized Bed Incineration Systems for the Ultimate Disposal of Toxic and Hazardous Materials. Proceedings of the 1st. Annual Hazardous Materials Management Conference. Philadelphia, Pa.**
- 29.- HALL R. R., HUNT G. T., MCCABE M. M. Y MILLIKEN J. O. (1984). Fluidized Bed Incinerator Performance Evaluation. Proceeding of the Ninth Annual Research Symposium, Incineration and Treatment of Hazardous Waste. EPA 600-9-84-015. Cincinnati, Ohio**
- 30.- SANTORELI J. (1988) Tecnología de la Incineración. Four nines inc. California, U.S.**
- 31.- CLYDE R. (1994). Summary of Us Regulations for Boilers and Industrial Furnaces (BIFs) Burning Hazardous Waste. U.S. Environmental Protection Agency.**
- 32.-MULLEN J. F. (1985) Fluidized Bed Combustion and Economics. Proven method of industrial waste disposal. LICA General Seminar. Dearborn, Michigan.**
- 33.- KUNZLI M. Y HALTINGER E. W. (1990), The Incineration Grate's Central Role in Thermal Waste Disposal. ABB Review 10/90. 12-22.**
- 34.- CARLSSON K. B. (1990). Limpieza de los Gases de Combustión en Plantas de Tratamiento de Residuos. Report de Asea Brown Boveri. Suecia.**
- 35.- RENSFELT E., WALDHEIM L. Y BLACKADER W. (1990). Fuel Gas from Municipal Waste in an Integrated Circulating Fluid Bed Gasification - Gas Cleaning Process. Studsvik Report. No. EP-91/5. Nyköping, Suecia.**

- 36.-AHLTROM CORP.** (1990). Korhula. Filandia. patente intern. No. WO 90/14559.
- 37.- CHEMICAL ENGINEERING.** (1984), 1, 97-100.
- 38.-GUTIERREZ M. C.** (1987). Estudio Técnico Económico para la Recuperación de Solventes Industriales de Desecho. (Tesis). Facultad de Química. UNAM.
- 39.- CARABIAS L. J., QUADRI T. G., AZUELA A. C. Y SÁNCHEZ G. J.** (1996). Programa para la Minimización y Manejo Integral de Residuos Industriales Peligrosos en México 1996-2000. INE-SEMARNAP. México D. F.
- 40.- ARDAVIN J. R.** (1995). La Incineración de residuos orgánicos en Hornos de Cemento. (Tesis), Facultad de química. UNAM