

120
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

EVALUACION DE PROCESOS TERMICOS PARA EL
TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
ROCIO PONCE ABAD

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1993



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

CONTENIDO

	Página
CAPITULO I INTRODUCCION	1
1.1 DEFINICIONES	2
1.2 CLASIFICACION DE RESIDUOS	7
1.3 OPCIONES DE TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE RESIDUOS	8
1.3.1 Procesos Físicos	9
1.3.1.1 Filtración	9
1.3.1.2 Sedimentación	9
1.3.1.3 Clarificación	9
1.3.1.4 Centrifugación	10
1.3.1.5 Flotación	10
1.3.1.6 Osmosis inversa	10
1.3.2 Procesos Químicos	10
1.3.2.1 Neutralización	11
1.3.2.2 Precipitación	11
1.3.2.3 Coagulación	11
1.3.2.4 Floculación	11
1.3.2.5 Oxidación y reducción	11
1.3.2.6 Intercambio iónico	12
1.3.2.7 Estabilización	12
1.3.3 Procesos Biológicos	12
1.3.3.1 Sistemas aerobios	12
1.3.3.2 Sistemas anaerobios	12
1.4 CARACTERISTICAS DE LOS RESIDUOS SUCEPTIBLES DE SER TRATADOS POR PROCESOS TERMICOS	13
CAPITULO II FUNDAMENTOS DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS	17
2.1 QUIMICA DE LA INCINERACION	18
2.2 TERMODINAMICA	19
2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR	20

CAPITULO III PRINCIPIOS Y PARAMETROS DE DISEÑO	23
3.1 PRINCIPIOS DE DISEÑO	23
3.1.1 Evolución de las tecnologías de tratamiento térmico	23
3.1.2 Consideraciones en la combustión de residuos	27
3.1.3 Calor de combustión	27
3.1.4 Balance de materia	28
3.1.5 Balance de energía	29
3.1.6 Exceso de aire	30
3.1.7 Procedimiento de cálculo	30
3.2 PARAMETROS DE DISEÑO	31
3.2.1 Temperatura	31
3.2.2 Tiempo de residencia	31
3.2.3 Turbulencia	32
3.2.4 Presión	32
3.2.5 Suministro de aire	32
3.2.6 Materiales de construcción	32
3.2.7 Aspectos adicionales	33
CAPITULO IV TECNOLOGIAS DE PROCESAMIENTO TERMICO.	39
4.1 INCINERACION	39
4.2 INCINERACION CATALITICA	40
4.2.1 Características de los catalizadores	40
4.2.2 Mecanismo de reacción	40
4.2.3 Diseño del proceso	41
4.2.4 Desactivación del catalizador	43
4.3 PIROLISIS	45
4.3.1 Química básica	45
4.3.2 Procesos de pirólisis	46
4.4 INCINERACION POR OXIGENO	48
4.5 CALCINACION	48
4.5.1 Descripción del proceso	49
4.5.1.1 <i>Calcinador de hogar abierto</i>	49
4.5.1.2 <i>Calcinador de horno rotatorio</i>	50
4.5.1.3 <i>Calcinador de lecho fluidizado</i>	50

4.6	DESTILACION	50
4.6.1	Descripción del proceso	51
4.6.1.1	<i>Destilación discontinua</i>	51
4.6.1.2	<i>Destilación continua</i>	51
4.6.1.3	<i>Destilación azeotropica</i>	51
4.6.1.4	<i>Destilación extractiva</i>	55
4.6.1.5	<i>Destilación molecular</i>	55
4.7	DESTILACION CON VAPOR	55
4.7.1	Descripción del proceso	57
4.8	AGOTADORES DE VAPOR	59
4.9	EVAPORACION	59
4.9.1	Tipos de evaporadores	61
4.9.1.1	<i>Evaporación indirecta</i>	61
4.9.1.2	<i>Evaporacion por contacto directo</i>	61
4.9.1.3	<i>Evaporación natural</i>	61
4.10	OXIDACION CON AIRE HUMEDO	61
4.10.1	Descripción del proceso	64
4.10.2	Características del proceso	64
4.11	INCINERACION OCEANICA	67
4.12	INCINERACION DE RESIDUOS HOSPITALARIOS	67

CAPITULO V OPERACION Y CONTROL 69

5.1	CONTROL DE LA ALIMENTACION DEL RESIDUO Y DE EMISIONES	69
5.2	CONTROL DE LA TEMPERATURA	70
5.3	ALIMENTACION DE LOS RESIDUOS AL EQUIPO	71
5.3.1	Alimentación de lodos y líquidos	71
5.3.2	Atomización de residuos líquidos	71
5.3.2.1	<i>Atomizador de taza rotatoria</i>	71
5.3.2.2	<i>Atomizador a presión en fluidos simples</i>	72
5.3.2.3	<i>Atomizador a baja presión en dos fluidos</i>	72
5.3.2.4	<i>Atomizador a alta presión en dos fluidos</i>	72
5.3.3	Alimentación de sólidos	72

3.4 EQUIPOS Y SERVICIOS AUXILIARES	72
3.4.1 Recepcion de residuos	73
3.4.2 Laboratorio de control	73
3.4.3 Almacenaje y mezclado	73
3.4.4 Pretratamiento	73
3.4.5 Disposición de las cenizas	73
3.4.6 Instrumentacion	74
3.4.7 Personal	74
3.5 MALFUNCIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS	75
CAPITULO VI LIMPIEZA DEL GAS	79
6.1 EMISIONES PRODUCIDAS EN LOS PROCESOS TERMICOS	79
6.1.1 Principales contaminantes	79
6.1.1.1 Gases acidos	79
6.1.1.2 Nonoxido de carbono	79
6.1.1.3 Componentes volátiles organicos	80
6.1.1.4 Oxido de nitrogeno	80
6.1.1.5 Materia organica polociclica	81
6.1.1.6 Particulas solidas	81
6.1.2 Emisiones dependiendo del tipo de sistema	81
6.1.2.1 Pirolisis	82
6.1.2.2 Incinerador de lecho fluidizado	82
6.1.2.3 Incinerador de horno rotatorio	82
6.1.2.4 Incinerador multicamaras	82
6.1.2.5 Incinerador de aire controlado	83
6.2 LIMPIEZA DEL GAS	83
6.2.1 Remoción de particulas	83
6.2.2 Gases ácidos y metales volátiles	85
6.2.3 Aspiradores y chimeneas	86
6.2.4 Postquemadores	86
6.2.5 Proceso de limpiado completo del gas	87
6.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIONES	87

6.3.1	Ventajas de postquemadores térmicos y de flama directa	87
6.3.2	Desventajas de postquemadores térmicos y de flama directa	87
6.3.3	Ventajas de postquemadores catalíticos	89
6.3.4	Desventajas de postquemadores catalíticos	89
6.3.5	Ventajas de torres espreadoras	89
6.3.6	Desventajas de torres espreadoras	89
6.3.7	Ventajas de torres empacadas	90
6.3.8	Desventajas de torres empacadas	90
6.3.9	Ventajas de precipitadores electrostáticos	90
6.3.10	Desventajas de precipitadores electrostáticos	90
CAPITULO VII RECUPERACION DE ENERGIA		91
7.1	SISTEMAS DE RECUPERACION DE ENERGIA	92
7.2	GENERACION DE VAPOR	94
7.2.1	Temperatura aproximada	94
7.2.2	Calor disponible	95
7.2.3	Generación de vapor	96
7.3	CONSIDERACIONES FINALES SOBRE LA RECUPERACION DE ENERGIA	96
CAPITULO VIII TECNOLOGIAS DISPONIBLES		100
8.1	INCINERADORES DE HORNO ROTATORIO	101
8.1.1	Descripción del sistema	101
8.1.2	Ventajas y desventajas del sistema	104
8.2	CAMARA DE COMBUSTION DE LECHO CIRCULANTE	105
8.2.1	Descripción del sistema	105
8.2.2	Ventajas y desventajas del sistema	108
8.3	INCINERADORES DE LECHO FLUIDIZADO	109
8.3.1	Descripción del sistema	109
8.3.2	Ventajas y desventajas del sistema	112

8.4	INGINERADORES DE INYECCION LIQUIDA	114
8.4.1	Descripcion del sistema	114
8.4.2	Ventajas y desventajas del sistema	116
8.5	INCINERADORES DE AIRE CONTROLADO	117
8.5.1	Descripcion del sistema	117
8.5.2	Ventajas y desventajas del sistema	116
CAPITULO IX TECNOLOGIAS DE INNOVACION		120
9.1	VITRIFICACION IN SITU	120
9.1.1	Descripcion de la tecnologia	121
9.1.2	Aplicación de la tecnologia	122
9.1.3	Ventajas y desventajas del sistema	122
9.1.4	Caracteristicas del residuo que afectan el funcionamiento	122
9.2	DESTRUCCION TERMICA POR INFRAROJO	123
9.2.1	Descripcion de la tecnologia	123
9.2.2	Aplicación de la tecnologia	124
9.3	DESORCION TERMICA	125
9.3.1	Descripcion de la tecnologia	125
9.3.1.1	<i>Desorción por calentamiento directo</i>	128
9.3.1.2	<i>Desorción por calentamiento indirecto</i>	126
9.3.1.3	<i>Extracción de vapor In situ</i>	126
9.3.2	Ventajas y desventajas del sistema	126
9.3.3	Caracteristicas del residuo que afectan el funcionamiento	127
9.4	COMBUSTOR DE SAL FUNDIDA	128
9.4.1	Descripcion de la tecnologia	128
9.4.2	Ventajas y desventajas del sistema	128
9.5	REACTOR ELECTRICO	129
9.5.1	Descripcion de la tecnologia	129
9.5.2	Ventajas y desventajas del sistema	129
9.6	ARCO DE PLASMA	130
9.6.1	Descripcion de la tecnologia	130
9.6.2	Ventajas y desventajas del sistema	131

CAPITULO X COSTOS	133
10.1 TAMANO DE LA CAMARA DE COMBUSTION PRIMARIA	133
10.2 TAMANO DE LA CAMARA DE COMBUSTION SECUNDARIA	137
10.3 ESTIMACION DEL COSTO DE INVERSION	139
10.4 ESTIMACION DEL COSTO DE EQUIPO Y ACCESORIOS	139
10.4.1 Sistema de almacenamiento de residuos	139
10.4.2 Sistema de carga al incinerador	142
10.4.3 Camara de combustión	142
10.4.4 Coraza de la camara y sistema de quemadores	146
10.4.5 Equipos de recuperación de energía	147
10.4.6 Equipos de control de contaminantes	148
10.4.7 Sistema de manejo del gas	149
10.7 AJUSTE AL ESTIMADO DE COSTO DE INVERSION	151
10.6 ESTIMACION DEL COSTO DE OPERACION	151
10.6.1 Costo de mano de obra	151
10.6.2 Costos de servicios	151
10.6.3 Costos de sustancias químicas	151
10.6.4 Costo de mantenimiento	154
10.6.5 Recuperación de energía	154
10.7 EJEMPLO DE ESTIMACION DE COSTO DE UN INCINERADOR	154
10.7.1 Tamano de las cámaras de combustión	156
10.8 CONSIDERACIONES FINALES	158
CAPITULO XI EVALUACION DE LO PROCESOS TERMICOS	160
CAPITULO XII LITERATURA CONSULTADA	171
INDICE DE TABLAS	174
INDICE DE FIGURAS	176

I. INTRODUCCION

En todas las actividades humanas se generan materiales residuales que no pueden ser aprovechados en el lugar donde se producen. Estos residuos se pueden reciclar, reutilizar o liberar al ambiente. La biósfera tiene la capacidad de transformar algunos desechos. sin embargo, se puede exceder fácilmente esta capacidad de la naturaleza si no se controlan estos residuos. (WILSON, 1987)

El rápido crecimiento de la industria y el incremento en la dependencia de los productos químicos son características de las naciones industrializadas que han producido beneficios a casi todos los sectores de la economía. sin embargo, asociado con todo esto se han producido también una serie de daños ambientales, por lo que cada vez se requiere más de un cuidadoso programa de planeación y control para el manejo de los residuos. (WENZ, 1980)

La industria en la actualidad tiende a minimizar la generación de desechos como es en el caso de la utilización de los materiales combustibles procedentes de las corrientes residuales, el uso de desechos y aguas residuales para la generación de combustible, agua caliente, vapor y/o energía eléctrica, reciclado de papel, vidrio, etc. son medidas encaminadas a la reducción de los efectos dañinos al medio ambiente producidos por una sociedad industrial.

Una de las alternativas más efectivas para proceder con algunos desechos, reduciendo su potencial nocivo y convirtiéndolos en energía, es el tratamiento térmico. Este método es el más efectivo y radical para disponer de los desechos, pero es también el más costoso.

Sin embargo, en los últimos años, se han perfeccionado los equipos y se ha logrado hacer una depuración casi perfecta de los gases, producto de la combustión.

Uno de los principales inconvenientes que tenían estos sistemas, era la gran cantidad de polvo y ceniza que se generaban, los cuales provocaban un alto grado de contaminación atmosférica. En la actualidad, se ha eliminado casi por completo la emisión de estas partículas a la atmósfera. (BEFFIS, 1969)

La literatura sobre estos tratamientos es abundante y se encuentra dispersa, por lo que en este estudio se pretende recopilarla e integrarla en un solo documento, que proporcione las bases a las instituciones y grupos que estén relacionados con el manejo y disposición de residuos peligrosos para que mediante un análisis más profundo de todos los aspectos involucrados se consideren los procesos térmicos como una alternativa en el tratamiento de residuos peligrosos.

1.1 DEFINICIONES

El término *residuo* se utiliza para denominar a los materiales que aparentemente no tienen utilidad, como pueden ser: los desechos domésticos, los trozos de concreto provenientes de la demolición de alguna estructura, las impurezas contenidas en una corriente de algún producto químico, etc. (BRUNNER, 1964)

En la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente define residuo como: 'cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento, cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó'. (BEFFIS, 1969).

Un *residuo sólido* de acuerdo con la definición, no necesariamente se encuentra en estado sólido, sino que puede estar en contenido en algún líquido, semisólido o gas. En la definición de USEPA para un residuo sólido se encuentra que puede ser cualquier basura, desperdicio, u otro material en estado sólido, líquido, semisólido o gaseoso. Estos últimos son residuos sólidos si son resultado de operaciones industriales, comerciales o de agricultura o de actividades comunitarias en la cuales el material: (LINDGREN, 1965)

-se descarga, se acumula, se almacena o se trata física, química o biológicamente antes de ser descargado, o

-materiales que han sido usados, reciclados, acumulados o almacenados y algunas veces son descargados o

-materiales que no son productos primarios de una operación de manufactura o minera, son productos secundarios o incidentales de una operación particular. En esta definición no se incluyen productos intermedios obtenidos en una etapa del proceso de manufactura que son procesados en el siguiente etapa.

Como *residuo peligroso* se define a un residuo sólido, o combinación de residuos sólidos, los cuales debido a su cantidad, concentración o a sus características físicas, químicas o infecciosas pueden causar o contribuir considerablemente a un incremento en la mortalidad o un incremento en enfermedades o incapacidades reversibles e irreversibles, o ser un peligro potencial para la salud humana o el medio ambiente cuando se tratan, almacenan, transportan o cualquier otra forma de manejo que se realice en forma inapropiada. (WILSON, 1987)

La Agencia de Protección Ambiental estadounidense, USEPA a través de la regulación 40 parte 261 define como residuos peligrosos a: (BRUNNER, 1991)

1. Residuos inflamables, código de riesgo I - Son aquellos que tengan al menos una de las siguientes propiedades:

a) Líquidos cuya temperatura de inflamación sea menor de 60°C (140°F). Las soluciones acuosas que contienen menos del 20 por ciento en volumen de alcohol están excluidas de esta definición.

b) Sustancias que pueden causar fuego mediante fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos, bajo condiciones normales de presión y temperatura.

c) Gases comprimidos inflamables.

d) Oxidantes.

2. Residuos corrosivos, código de riesgo C - Son aquellos que tengan alguna o ambas de las siguiente propiedades:

a) Residuos acuosos con pH igual o menor a 2.0 o pH igual o mayor a 12.5.

b) Líquidos que produzcan corrosión en el acero al carbono (grado SAE 1030) a una velocidad mayor de 0.25 pulg/año.

3. Residuos reactivos, código de riesgo R - Son aquellos que tengan al menos una de las siguientes propiedades:

a) Sustancias normalmente inestables que sufran cambios físicos y/o químicos violentos sin detonante.

b) Sustancias que reaccionen violentamente con el agua.

c) Residuos que formen una mezcla explosiva potencial cuando su superficie se moje con agua.

d) Sustancias que generen gases nocivos, vapores o humos cuando se mezclen con agua.

e) Cianuros o sulfuros que generen gases nocivos, vapores o humos cuando se expongan a condiciones de pH entre 2 y 12.5.

f) Residuos que exploten y/o generen una reacción explosiva cuando se someten a una fuente de energía o cuando se calienten en confinamiento.

g) Sustancias capaces de explotar a temperatura y presión estandar.

h) Explosivos clase A, clase B o 'prohibidos'

A 4. Residuos tóxicos P. código de riesgo T- SI la muestra del residuo contiene exceso de los contaminantes que se nombran en la siguiente tabla, se considerará residuo peligroso.

Tabla 1.1

NUMERO DE RESIDUO <u>PELIGROSO (EPA)</u>	<u>CONTAMINANTE</u>	CONCENTRACION <u>MAXIMA (mg/l)</u>
D004	Arsenico	5.0
D005	Bario	100.0
D006	Cadmio	1.0
D007	Cromo	5.0
D008	Plomo	5.0
D009	Mercurio	0.2
D010	Selenio	1.0
D011	Plata	5.0
D012	Endrin ¹	0.02
D013	Lindane ²	0.4
D014	Metoxiclor ³	10.0
D015	Toxafeno ⁴	0.5
D016	2,4 D ⁵	10.0
D017	2,4,5 TP Silvex	1.0

¹ (1,2,3,4,10,10-hexacloro-1,7-epoxi-1,4,4a,5,6,7,8,8a-octahidro-1,4-endo-5,8-dimetano naftaleno)

² (1,2,3,4,5,6-hexaclorociclohexano, isomero gamma)

³ (1,1,1-tricloro-2,2-bis (p-metoxifenil) etano)

⁴ (C₁₀H₁₀Cl₂O, 67-69 % CLORADO)

⁵ (ACIDO 2,4-DICLOROFENOXIACETICO)

⁶ (ACIDO 2,4,5-TRICLOROFENOXIPROPIONICO)

5. Residuos peligrosos agudos, código de riesgo H - Son aquellas sustancias que en pequeñas dosis son fatales para el humano o no existen datos de toxicidad en el humano pero se han encontrado fatales para animales de laboratorio en las correspondientes concentraciones humanas.

6. Residuos tóxicos, código de riesgo T. Son los residuos que producen efectos cancerígenos, mutagénicos o teratogénicos en el humano u otras formas de vida.

Cancerígeno- Produce o tiende a producir cáncer.

Mutagénico- Capaz de producir mutaciones a las futuras generaciones.

Teratogénico- Produce crecimiento anormal en el feto.

Otro tipo de residuos peligrosos son los residuos biológicos infecciosos que son aquellos provenientes de hospitales y que por sus características infecciosas representan un peligro para la salud.

Además de estas características las USEPA define a un residuo como peligroso si cumple con alguna de las siguientes condiciones:

Proveniente de una fuente no especificada (residuos genéricos de los procesos industriales).

Proveniente de una fuente especificada (de industrias específicas)

Productos o intermediarios químicos específicos

Mezclas que contienen un residuo peligroso de la tabla

1.2 CLASIFICACION DE RESIDUOS

Existen diferentes sistemas de clasificación relacionados directamente con los requerimientos del proceso (KIANG, 1982):

1. *Clasificación de acuerdo al estado físico.*- Esta clasificación es necesaria para la selección y diseño del sistema de tratamiento del residuo, el sistema de alimentación y la elección del equipo de proceso.

2. *Clasificación química.*- Es necesaria para hacer la selección de los parámetros apropiados de diseño, la selección de materiales de construcción, el diseño del incinerador, las posibilidades de recuperación de productos, los requerimientos de combustible y los sistemas de tratamiento de efluentes.

3. *Clasificación térmica.*- Necesaria para determinar los requerimientos de energía para el proceso y selección de la configuración del sistema.

Con base en las características físicas, los materiales residuales se clasifican como: gases, líquidos, suspensiones y sólidos.

De acuerdo con las características químicas, se clasifican como:

-Residuos limpios: Dentro de este grupo se encuentran los hidrocarburos que contengan únicamente carbono, oxígeno e hidrógeno. Los productos de la oxidación de estos se consideran limpios y pueden descargarse a la atmósfera.

-Residuos que generan contaminantes gaseosos: Los productos de la oxidación de este tipo de residuos contienen contaminantes gaseosos como son hidrógeno, cloro, etc.

-Residuos que contienen metales pesados: Los productos de la oxidación de metales se encuentran normalmente en estado sólido a las temperaturas típicas del proceso. Estas características afectan la selección y diseño del equipo de proceso y de los sistemas de tratamiento en la salida del gas.

Residuos que contienen metales alcalinos: Dependiendo de la temperatura del proceso, este tipo de residuos generan partículas. La selección y diseño del equipo de proceso y de los parámetros de diseño son críticos para que los sistemas operen sin presentar dificultades.

Con base en las propiedades térmicas:

Residuos combustibles: Son aquellos residuos en los cuales se lleva a cabo la reacción de oxidación sin necesidad de energía adicional.

Residuos no combustibles: Son aquellos que presentan valores relativamente bajos de Btu y que requieren energía adicional para llevar a cabo la reacción de oxidación.

En esta última clasificación es importante considerar el contenido de componentes volátiles para el diseño de sistemas de evaporación y de agotamiento con vapor.

1.3 OPCIONES DE TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE RESIDUOS

El manejo apropiado de los residuos involucra el análisis de todas las opciones viables para cada material. Dentro de estas se encuentran (BRUNNER, 1991):

1. Tratamientos

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

2. Disposición final

- a) Pozos profundos
- b) Relleno Sanitario
- c) Composta
- d) Entierro
- e) Encapsulación v solidificación
- f) Vaciado en el océano
- g) Diluir v dispersar
- h) Reciclado v recuperación

3. Reducción de La generación de residuos

1.3.1 Procesos Físicos

1.3.1.1 FILTRACION

El paso inicial en el tratamiento de aguas residuales es la separación sólido-líquido. Se utilizan filtros y/o tamices para remover los sólidos grandes como plásticos, madera y papel. Los sólidos pequeños permanecen en la fase líquida y requieren tratamiento posterior. (WENTZ, 1989)

1.3.1.2 SEDIMENTACION

Es la remoción de sólidos suspendidos en líquidos mediante el asentamiento de estos por gravedad. (WENTZ, 1989)

1.3.1.3 CLARIFICACION

Los clarificadores se usan frecuentemente para lograr una sedimentación por gravedad y una remoción de sólidos más rápida. El objeto de la clarificación es producir efluentes líquidos más limpios. (WENTZ, 1989)

1.3.1.4 CENTRIFUGACION

Se emplea frecuentemente para eliminar el agua de residuos lodosos con un porcentaje en peso de solidos del 10 al 40%. El objetivo de esto es producir una torta con suficiente densidad, fuerza y contenido de solidos que permita transportarla como residuo solido a un lugar de disposición final. (WENTZ, 1989)

1.3.1.5 FLOTACION

Los solidos de baja densidad y los hidrocarburos solidos se pueden separar de los liquidos por flotacion en aire. El aire se introduce dentro del residuo liquido en forma de pequeñas burbujas que atrapan las particulas que se desean remover. (WENTZ, 1989)

1.3.1.6 OSMOSIS INVERSA

En el proceso de ósmosis inversa, un solvente fluye a través de una membrana semipermeable desde una solución diluida hacia otra de mayor concentración. La presión osmótica de la solución es la presión que provoca el paso del solvente a través de la membrana. Normalmente, el solvente fluye desde la solución de mayor concentración hacia la de menor concentración pero si la presión diferencial excede a la presión osmótica el flujo a través de la membrana será desde la solución más diluida hacia la más concentrada. El proceso de ósmosis inversa se aplica en residuos acuosos que contienen sales en solución para producir salmueras concentradas y agua de alta pureza. (WENTZ, 1989)

1.3.2 Procesos Químicos

1.3.2.1 NEUTRALIZACION

La neutralización de residuos ácidos y básicos constituye un tratamiento para reducir las características de corrosividad del desecho.

Este proceso se utiliza frecuentemente en el tratamiento de aguas residuales. La neutralización consiste en la adición de una sustancia para cambiar el pH del residuo a un nivel neutro (en un ámbito de 6 a 8). (WENTZ, 1989)

1.3.2.2 PRECIPITACION

Si la corriente residual tiene una alta concentración de materiales pesados se utiliza la precipitación química. Los metales se precipitan variando los niveles de pH, dependiendo del metal, formando una sal insoluble. (WENTZ, 1989)

1.3.2.3 COAGULACION

Es la adición y el mezclado de un coagulante que neutraliza las carga y colapsa las partículas coloidales de tal forma que se aglomeran y se sedimentan. Las especies coloidales existentes en las aguas residuales incluyen arcilla, metales y compuestos orgánicos. (WENTZ, 1989)

1.3.2.4 FLOCULACION

Es la aglomeración de partículas coloidales que se han sometido a un tratamiento de coagulación. La floculación se provoca por el mezclado lento de partículas coloidales coaguladas bajo condiciones de pH controlado para producir grandes partículas, aumentando la eficiencia en la etapa de eliminación de agua. (WENTZ, 1989)

1.3.2.5 OXIDACION Y REDUCCION

Estos procesos se utilizan para transformar contaminantes tóxicos en sustancias menos dañinas. La oxidación es una reacción química con un incremento en la valencia debido a la pérdida de electrones. La reducción es una disminución en la valencia debida al incremento de electrones. Las reacciones que involucran oxidación y reducción se llaman reacciones redox. (WENTZ, 1989)

1.3.2.6 INTERCAMBIO IONICO

Es un intercambio reversible de iones entre la fase líquida y la fase sólida. Los iones de los grupos funcionales cargados en la superficie de un sólido son reemplazados por iones de carga similar en una solución. Los materiales de intercambio iónico deben tener sitios activos en su estructura, alta capacidad de regeneración, selectividad para especies, estabilidad química y física y baja solubilidad. (WENTZ, 1969)

1.3.2.7 ESTABILIZACION

En este sistema se reduce la solubilidad de los constituyentes peligrosos, reduciéndose el área expuesta que permite la migración de los contaminantes. (WENTZ, 1969)

1.3.3 Procesos Biologicos

1.3.3.1 SISTEMAS AEROBIOS

El objetivo de estos sistemas es desarrollar microorganismos para convertir compuestos orgánicos en materiales que puedan ser removidos por técnicas convencionales de separación y en sustancias no peligrosas como dióxido de carbono y agua. La reacción que se lleva a cabo es la siguiente: (WENTZ, 1969)

Compuesto orgánico + O₂ → CO₂ + H₂O + otro producto + energía

1.3.3.2 SISTEMAS ANAEROBIOS

En estos sistemas ocurre la siguiente reacción:

Compuesto orgánico + compuesto de oxígeno → CO₂ + CH₄ + otros productos + energía

Los productos generados dependen del tipo de compuesto orgánico y de otros nutrientes presentes. Del grado de actividad biológica y de los elementos combinados con el oxígeno. Las fuentes de oxígeno como nitratos producen nitrógeno, los sulfatos producen ácido sulfhídrico en los procesos anaerobios. Excepto por el tipo de fuente de oxígeno, los parámetros de operación son similares a los utilizados en sistemas aeróbios. (VENTZ, 1969)

1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS SUCEPTIBLES DE SER TRATADOS POR PROCESOS TÉRMICOS

Los residuos que pueden ser incinerados son todos aquellos que se queman (compuestos que se descomponen a 1000°C aproximadamente) y no pueden depositarse. (BERNARD, 1969)

Para determinar si un residuo es susceptible de ser incinerado ha que considerar los siguientes factores: (BRUNNER, 1991)

Contenido de humedad.- Entre mayor sea el contenido de humedad mayor será la cantidad de combustible necesario para destruir el desecho. Un residuo acuoso con un contenido de humedad mayor del 95% o un residuo lodoso con un contenido de menos del 15% de sólidos se considera como un candidato pobre para incinerarse.

Poder calorífico.- La incineración es un proceso de destrucción térmica donde el residuo se degrada a una forma no putrescible mediante la aplicación y mantenimiento de una fuente de calor. Si el poder calorífico no es significativo, la incineración no puede considerarse como un método práctico. Generalmente, los residuos con un poder calorífico menor a 1000 Btu/lb no son incinerados. No obstante, hay materiales esencialmente inertes que contienen una pequeña cantidad de combustible lo que provoca que la incineración sea una opción viable a pesar del bajo poder calorífico del material.

Sales inorgánicas.- Los residuos ricos en sales alcalinas e inorgánicas representan problemas para los sistemas de incineración convencionales ya que las sales se depositan en la superficie del horno disminuyendo la eficiencia del incinerador.

Contenido de sulfuros o halógenos.- La presencia de cloruros o sulfuros en un residuo generaran gases ácidos. Los costos para proteger al equipo del ataque de los compuestos ácidos deben compararse con los costos que produciria tratar el residuo por otro metodo.

Compuestos radioactivos.- Existen incineradores especialmente diseñados para la destrucción de materiales radioactivos ya que estos residuos no se pueden incinerar por sistemas tradicionales.

TABLA 1.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO FISICO

METODO	FUNCION (a)	TIPO DE RESIDUO (b)	FORMA DEL RESIDUO (c)
Gentrifugación	VR Se	1,2,3,4,5	L
Dialisis	VR Se	1,2,3,4	L
Encapsulación	St	1,2,3,4,5,6	L,S
Filtración	VR Se	1,2,3,4	L,G
Flotación	VR Se	1,2,3,4,5	L
Osmosis Inversa	VR Se	1,2,4,6	L
Sedimentación	VR Se	1,2,3,4,5	L
Gravedad	Se	2,4,9	L
Ultrafiltración	Se	1,2,3,4,5	L
Microondas	De	1,2,3,4,5,7,8	S,L,G
Separación magnética	Se	1,2,3,4,5,8	S,L,G

Kokoszka, *Environmental Management Handbook*, 1989

Notas:

(a) VR = Reducción de volumen

Se = Separación

De = Desintoxicación

St = Almacenaje

(b) 1 = Químicos inorgánicos sin metales pesados

2 = Químicos inorgánicos con metales pesados

3 = Químicos orgánicos sin metales pesados

4 = Químicos orgánicos con metales pesados

5 = Radioactivos

6 = Biológicos

7 = Flamables

8 = Explosivos

9 = Aceite/agua

(c) L = Líquido

G = Gas

S = Sólido

TABLA 1.3 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO QUÍMICO

METODO	TIPO DE RESIDUO		FORMA DEL RESIDUO
	(a)	(b)	
Coagulación	Se	1,2,3,4,5	L
Intercambio iónico	VR Se De	1,2,3,4,5	L
Floculación	VR Se	1,2,3,4,5	L
Neutralización	De	1,2,3,4	L
Oxidación	De	1,2,3,4	L
Reducción	De	1,2	L
Precipitación	VR Se	1,2,3,4,5	L
Hidrólisis	De	3,4	L
Electrólisis	Se	2	L
Ozonación	De	1,2,3,4	L,G

Kokoszka, Environmental Management Handbook, 1989

Notas: Ver Tabla 1.2

TABLA 1.4 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO

METODO	TIPO DE RESIDUO		FORMA DEL RESIDUO
	(a)	(b)	
Lodo activado		3,6	L
Laguna de aeración		3,6	L
Digestión anaerobia		3,6	L
Filtros anaerobios		3,6	L
Discos biológicos		3,6	L
Laguna de estabilización		3,6	L
Compost		3,4,6	S
Enzimas		3,4,6	L

Kokoszka, Environmental Management Handbook, 1989

Notas: Ver Tabla 1.2

II. FUNDAMENTOS DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS

Los tratamientos termicos son procesos en los cuales se utiliza la oxidación termica a alta temperatura para convertir un residuo a un material menos voluminoso, menos toxico o menos nocivo. Los productos principales de la operacion son dióxido de carbono, vapor de agua y cenizas. Los productos peligrosos generados son compuestos que contienen sulfuros, nitrógeno, halogenos y metales pesados (mercurio, arsenico, selenio, plomo y cadmio).

Si los gases de combustión producidos en los procesos térmicos contienen compuestos indeseables, es necesario un equipo para el control de contaminantes atmosféricos. Los efluentes sólidos y líquidos pueden requerir tratamiento. (KIANG, 1982)

La mayoría de los residuos consisten de carbón, hidrógeno y oxígeno junto con halogenos, sulfuros, nitrógeno y posiblemente metales. Existen también otros elementos, pero por lo general se encuentran únicamente pequeñas trazas de ellos por lo que no se consideran en la aplicación de las tecnología térmicas.

La estructura molecular generalmente determina la peligrosidad de una sustancia para la salud y el ambiente. Si la molécula del residuo se puede destruir o reducir a dióxido de carbono, agua y sustancias inorgánicas, las sustancias orgánicas se pueden considerar inocuas. Debido a esto, la destrucción térmica ha sido reconocida como uno de los tratamientos preferidos en el manejo de residuos peligrosos. La incineración es particularmente una tecnología conveniente cuando se trata de grandes cantidades de residuos orgánicos peligrosos, debido a la alta eficiencia de destrucción de la mayoría de residuos orgánicos con una mínima cantidad de emisiones indeseables a la atmósfera, las cuales pueden controlarse. (WENTZ, 1989)

2.1 QUIMICA DE LA INCINERACION

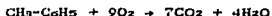
La incineración es la oxidación controlada a alta temperatura de un compuesto orgánico para producir dióxido de carbono y agua. Pueden producirse algunas sustancias inorgánicas como ácidos, sales y compuestos metálicos. (WENTZ, 1990)

Los procesos de incineración para el manejo de residuos peligrosos son muy complejos y requieren el control de la cinética de reacción química bajo condiciones de estado no estacionario. Se llevan a cabo todos los mecanismos de transferencia de calor bajo condiciones de alta temperatura de reacción que involucran una gran liberación de calor. La complejidad aumenta al considerar los mecanismos de flujo que comprenden sistemas de flujo laminar y flujo turbulento. Otro factor que debe considerarse es la variación de la composición del residuo peligroso alimentado al sistema de incineración.

Las reacciones químicas que ocurren en la incineración representan un proceso de combustión aplicado a la destrucción de sustancias indeseables. Se lleva a cabo una compleja secuencia de reacciones en las que finalmente se obtienen productos similares. Cuando un alcano se incinera con aire, se obtienen como productos de la combustión dióxido de carbono y agua. Un ejemplo de este tipo de reacción es:



Los hidrocarburos aromáticos se incineran en forma similar como se señala en la siguiente reacción:



La incineración de mezclas de sustancias peligrosas como etano y tolueno principia cuando la temperatura de la mezcla de residuos y aire se eleva para permitir que la reacción de oxidación ocurra espontáneamente. A esta temperatura ocurre la ruptura de los enlaces entre los elementos de la mezcla reaccionante, formándose radicales libres, de esta forma se obtienen los productos de la combustión completa.

2.2 TERMODINAMICA DE LA INCINERACION

Existen dos leyes de la termodinámica directamente relacionadas con la incineración. La primera ley de la termodinámica enuncia que la cantidad de energía es constante, lo que implica que la energía que entra al sistema debe ser igual a la energía que sale de este. (WENTZ, 1960)

Esta primera ley establece que la energía debe conservarse pero no impone restricciones en la dirección de la transformación de la energía. La segunda ley de la termodinámica establece que en cualquier proceso la transferencia de calor se llevará a cabo de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura.

Todos los procesos de incineración operan de acuerdo a la primera y segunda ley de la termodinámica. La temperatura dirige la dirección de la transferencia de calor. La velocidad de transferencia será proporcional a la diferencia de temperaturas.

El término entalpia está referido a la energía de una sustancia a determinada temperatura respecto a la misma sustancia a diferente temperatura. La temperatura de incineración puede ser calculada mediante el calor de reacción y las propiedades de los productos generados, así como, por la cantidad de aire en exceso dentro del incinerador.

El valor de calentamiento neto (NHV) de una mezcla de residuos peligrosos se puede determinar de la siguiente forma:

$$\text{NHV}_{\text{MEZCLA}} = \sum_{i=1}^n X_i \text{NHV}_i \quad (2.1)$$

Pueden hacerse algunas simplificaciones con las siguientes suposiciones:

1. El requerimiento estequiométrico de aire para cualquier hidrocarburo es 0.01 ft³ de aire por Btu. Para residuos peligrosos normalmente la temperatura de referencia es 60°F, por lo que el requerimiento de aire es 7.5 x 10⁻⁴ lb air/Btu

2. La capacidad calorífica del exceso de aire es $0.3 \text{ Btu/lb}^\circ\text{F}$.
3. La incineración se lleva a cabo en condiciones adiabáticas.

El NHV de la mezcla de residuos queda entonces:

$$\text{NHV} = (1 + 7.5 \times 10^{-4} \text{ NHV})(0.3)(t - 60) + (EA)(7.5 \times 10^{-4})(\text{NHV})(0.3)(t - 60) \quad (2.2)$$

Rearreglando:

$$t = 60 + \text{NHV} / [(0.3)(1 + EA)(7.5 \times 10^{-4})(\text{NHV})] \quad (2.3)$$

Utilizando esta ecuación se puede obtener la temperatura de los residuos dentro del incinerador.

2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR

Para lograr una transferencia de calor óptima en un proceso térmico, deben cumplirse los siguientes objetivos (WENTZ, 1969) :

1. Maximización de las velocidades de transferencia de calor, de acuerdo a los factores económicos.
2. Utilización del intercambio de calor siempre que sea práctico.
3. Minimización de las pérdidas de calor en los alrededores mediante aislamiento.

En la destrucción térmica de un residuo peligroso interactúan todos los procesos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

Conducción.— Es la transferencia de calor de un elemento a otro debida a un gradiente de temperatura. La conducción comprende la transferencia de energía de una molécula a otra molécula adyacente. Cuando se trata de fases líquidas o gaseosas la conducción es suplementada por la convección.

Convección.- Es la transferencia de calor que se lleva a cabo por el movimiento del fluido. La convección natural es resultado del movimiento provocado por las variaciones en la densidad debidas a las diferencias de temperatura. En convección forzada, el movimiento es inducido por algún mecanismo externo como puede ser un ventilador o una bomba.

Radiación.- La transmisión de calor es resultado de la transferencia entre partículas en las que no existe un contacto físico, pero si una diferencia de temperaturas entre ellas. Las partículas de mayor temperatura emitirán mas energía y absorberán menos, y viceversa, las partículas de menor temperatura absorberán mas energía y la emitirán menor proporción.

El mecanismo de transferencia de calor por conducción a través de un sólido homogéneo puede ser expresado por:

$$Q = -k A \frac{dt}{dx} \quad (2.4)$$

donde: Q = velocidad de conducción de calor en x

A = sección transversal normal al eje de las x

$-dt/dx$ = gradiente de temperatura

k = conductividad térmica, es una propiedad física de cada sustancia

Las pérdidas de calor por conducción aumentan proporcionalmente con el área de la superficie refractaria y con la temperatura de incineración. Estas pérdidas disminuyen significativamente con el aislamiento del equipo (con lo cual se incrementa el espesor del ladrillo refractario) (VENTZ, 1969) .

La transferencia de calor por convección esta relacionada con el medio de convección y la geometría del sistema. La ecuación esta dada por:

$$Q = h A (T_2 - T_1) \quad (2.5)$$

donde Q = transmisión de calor por convección

h = coeficiente de película de la transferencia de calor

A = superficie de transferencia de calor

T₁ = temperatura ambiente

T₂ = temperatura en la interfase

Mientras que la conducción y convección se afectan por las diferencias de temperatura, el mecanismo de radiación se incrementa con el nivel de temperatura. A niveles bajos de temperatura, la conducción y la convección tienen una mayor contribución en la transferencia de calor, mientras que a mayores temperaturas la radiación controlara la transferencia. Cuando una partícula esta caliente, la energía radiante es emitida a determinada velocidad dependiendo de la temperatura, color y textura de la partícula. Las pérdidas de calor por radiación pueden expresarse por la siguiente ecuación:

$$Q = 0.174 A \epsilon [(T_2/100)^4 - (T_1/100)^4] \quad (2.6)$$

donde Q = cantidad de calor transferido

ϵ = emisividad, depende del color y textura de la partícula

A = superficie de transferencia

T₁ = temperatura absoluta del elemento de menor temperatura

T₂ = temperatura absoluta del elemento de mayor temperatura

En el sistema de incineración están presentes los tres mecanismos de transferencia de calor, cada uno de ellos se debe considerar en el diseño. Debe notarse también que debido a las altas temperaturas involucradas en el proceso de incineración, los mecanismos de radiación y conducción son mas significativos que el mecanismo de convección (WENTZ, 1980).

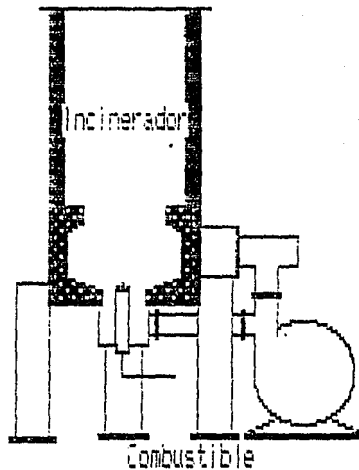
III. PRINCIPIOS Y PARAMETROS DE DISEÑO

3.1 PRINCIPIOS DE DISEÑO

3.1.1 Evolución de las tecnologías de tratamiento térmico

La práctica de la incineración se remonta al descubrimiento del fuego y a la generación de residuos combustibles. En la figura 3.1 se ilustra un antiguo sistema típico de incineración. Los desechos y el aire se mezclan en un horno refractario donde los materiales orgánicos se oxidan. Los productos de la oxidación se descargan a la atmósfera. Este tipo de sistema de incineración cumplía con sus propósitos cuando los residuos generados eran simples. Cuando los residuos tuvieron características más complejas y comenzaron a tomarse en cuenta los efectos ambientales, se introdujeron equipos de control para la contaminación del aire dentro del sistema (figura 3.2). Con la escasez de energía y materias primas, tuvieron que integrarse sistemas para la recuperación de subproductos y hubo que aprovecharse el calor del residuo, en la figura 3.3 se ilustra un ejemplo de estos sistemas. Actualmente sistema de incineración es una compleja planta de procesamiento. (KIANG, 1982)

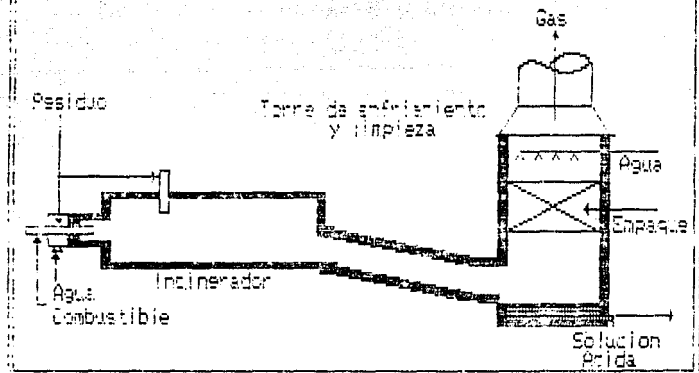
FIGURA 3.1
INCINERADOR ABIERTO



Fuente: Kiang, 1982. Hazardous Waste Processing Technology

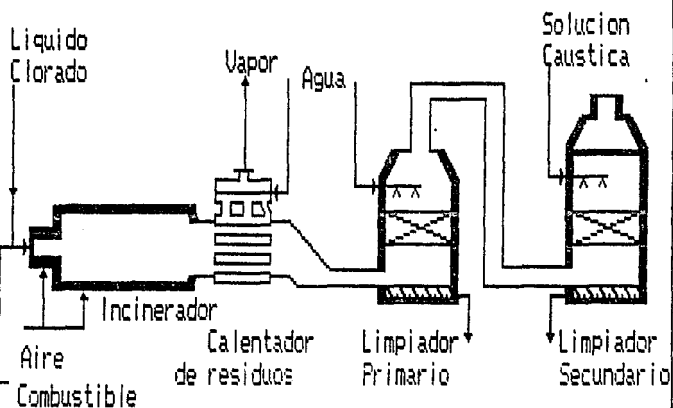
Figura 3.2

SISTEMA DE INCINERACION DE HIDROCARBUROS CLORADOS



Fuente: Wang, 1988, Hazardous Waste Processing Technology

FIGURA 3.3
 SISTEMA DE INCINERACION DE HIDROCARBUROS CLORADOS
 CON CALENTAMIENTO DEL RESIDUO Y RECUPERACION DE
 SUBPRODUCTOS



Fuente: Kiang, 1982. Hazardous Waste Processing Technology

3.1.2 Consideraciones para la combustión de residuos

El diseño del incinerador se basa principalmente en el proceso de combustión. En la mayoría de los casos no se conoce la estructura química de los residuos, por lo que para realizar los cálculos es necesario basarse en algunas suposiciones: (BRUNNER, 1991)

- Todo el hidrógeno presente se transforma en vapor de agua, o en agua.
- Todos los cloruros (o fluoruros) se convierten en ácido clorhídrico, HCl (o fluorhídrico, HF)
- Todo el carbono se convierte en dióxido de carbono, CO₂.
- Todos el azufre se convierte en dióxido de azufre, SO₂.
- Los metales alcalinos se convierten en hidróxidos
- Los metales no alcalinos se convierten en óxidos.
- Todo el nitrógeno del residuo, combustible o aire, se encuentra como molécula diatómica, N₂.

3.1.3 Calor de Combustión

El calor de combustión es una de las propiedades fundamentales de los materiales residuales y existen diferentes métodos para su determinación. Experimentalmente puede determinarse con una bomba calorimétrica. Otra forma de determinar el calor de combustión puede ser calculando el calor de reacción de la combustión, mediante la formación de calor. Frecuentemente los cálculos deben realizarse sin contar con datos experimentales, en estos casos se utiliza un método empírico el cual se basa en el hecho de que la cantidad de calor liberado en la oxidación de un amplio ámbito de componentes está relacionado con la cantidad teórica de oxígeno requerido para la combustión.

De esta forma el calor de combustión se puede estimar por:
(KIANG, 1982)

$$H_c = 6000 R \text{ Btu/lb} \quad (3.1)$$

donde R = Requerimiento estequiométrico de oxígeno en lb/lb de combustible. Este método es válido para las corrientes residuales que contengan únicamente oxígeno, carbono e hidrógeno. Aunque también se usa para estimar el calor de combustión de materiales que contengan otros elementos. Sin embargo, es necesario conocer el equilibrio termodinámico del proceso de combustión y las condiciones de oxidación térmica para estimar la demanda estequiométrica de oxígeno y determinar el calor de combustión.
(KIANG, 1982)

3.1.4 Balance de Materia

El balance de materia es una expresión cuantitativa de la ley de la conservación de la materia:

$$\text{entrada} = \text{salida} + \text{acumulación}$$

El análisis estequiométrico es un balance general de materia en el cual se considera al proceso de incineración como una reacción química ideal en la que se combinan materiales, combustible y aire. (KIANG, 1982)

Un balance de materia típico es la incineración del propano en aire.



Desarrollando esta ecuación se obtiene la siguiente información:

1. La demanda estequiométrica de oxígeno: para el propano es 3.63 lb/lb residuo

2. La razón estequiométrica combustible aire: para el propano es 1 a 15.81 en peso

3. Productos estequiométricos de la combustión: para el propano son dióxido de carbono, vapor de agua y oxígeno

4. Análisis estequiométrico del gas: en el caso del propano es:

	lb/lb residuo	% peso	% volumen
N ₂	12.17	72.40	73.18
CO ₂	3.00	17.85	11.48
H ₂ O	1.64	9.75	15.34
TOTAL	16.81		

3.1.5 Balance de Energía

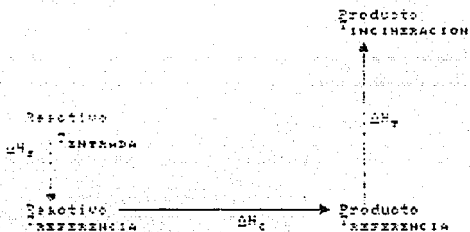
El balance de energía en la incineración involucra el calor de combustión y la temperatura. La temperatura es una función de estado que representa una propiedad instantánea de los reactivos y de los productos de la incineración. El calor de combustión depende de la temperatura y los desechos. En la figura 3.4 se describe un modelo para desarrollar el balance de energía. (KIANG, 1982)

Los residuos y el aire a la temperatura de entrada T_e se enfrían hasta la temperatura de referencia T_r , a la cual se determina el calor de combustión. Se lleva a cabo la reacción de oxidación a la temperatura de referencia T_r , el calor de enfriamiento y de la oxidación se utiliza para obtener el calor de los productos gaseosos a la temperatura de incineración T_i . La ecuación resultante queda:

$$\Delta H_e + \Delta H_c = \Delta H_r$$

Esta ecuación se puede usar para determinar la temperatura de incineración para un determinado desecho y para estimar los requerimientos de combustible auxiliar.

FIGURA 3.4
 Balance de energía



MIANO: HAZARDOUS WASTE PROCESSING TECHNOLOGY, 1992

3.1.6 Exceso de Aire

Al resolver el balance de materia se obtiene la cantidad estequiométrica de aire requerido para la combustión completa. En la práctica el aire necesario para que la combustión se lleve a cabo es mayor a la cantidad estequiométrica, ya que esta implica que el proceso se lleve a cabo con una eficiencia del 100%, es decir, que el aire tenga contacto con el 100% del residuo, que todo el aire reaccione y que esta reacción ocurra instantáneamente. (BRUNNER, 1991)

Actualmente se considera que para desechos gaseosos un 5% arriba de los requerimientos estequiométricos es suficiente, pero para residuos sólidos o lodos se requieren un exceso de aire del 100 a 200% de la cantidad estequiométrica.

3.1.7 Procedimiento de Cálculo

Para realizar el cálculo de un proceso de incineración es necesario plantear las siguientes ecuaciones: (KIANG, 1992)

- ecuaciones de balance de materia
- ecuaciones de balance de energía
- ecuaciones de equilibrio físico
- ecuaciones de equilibrio químico

El criterio básico para el equilibrio termoquímico es minimizar la energía libre de Gibbs en el sistema, esto es:

$$dG = 0$$

Se determinan la temperatura y la composición considerando todos los productos posibles cumpliendo con los balances de materia y energía obteniendo la mínima energía libre de Gibbs y la solución óptima del sistema. Existen programas de computadora para resolver este sistema.

Estos cálculos están basados en la suposición de que el proceso se encuentra en equilibrio térmico. Sin embargo, en la práctica, las reacciones de incineración se realizan a una velocidad finita dependiendo de la temperatura y las concentraciones de las especies reaccionantes. En la mayoría de los incineradores la velocidad de reacción no controla la velocidad de incineración.

3.2 PARAMETROS DE DISEÑO

Los factores que se consideran en el diseño de un sistema de incineración incluyen: (WENTZ, 1989)

3.2.1 Temperatura

En cualquier proceso de destrucción térmica, la temperatura es probablemente el factor más importante para la destrucción del material peligroso. La eficiencia de destrucción y remoción en cualquier operación de incineración depende de la temperatura del incinerador. La temperatura de entrada asegura la destrucción del residuo. La temperatura de entrada se define como la temperatura de operación inicial en la destrucción del residuo peligroso. (WENTZ, 1989)

3.2.2 Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia está determinado por el volumen del incinerador para un determinado flujo. El tiempo de residencia es el tiempo que deben permanecer los productos de la combustión incompleta a la temperatura de incineración para asegurar su conversión a dióxido de carbono y agua. (WENTZ, 1989)

3.2.3 Turbulencia

El grado de turbulencia se utiliza para disminuir los requerimientos de temperatura de operación y tiempo de residencia. La configuración de el incinerador afecta la facultad de destrucción de los residuos. La selección de bombas, ventiladores y mamparas debe basarse en el tipo de desecho que va ha ser incinerado y en las regulaciones de eficiencia de remoción. La transferencia de calor y el flujo del fluido deben considerarse para calcular los requerimientos de turbulencia en el diseño de la unidad de destrucción termica. (WENTZ, 1969)

3.2.3 Presion

La mayoría de las operaciones de incineración de residuos peligrosos se diseñan para operar a presiones ligeramente negativas para reducir las posibles fugas. Sin embargo, hay sistemas que operan a presiones elevadas, en este caso se requiere diseños sellados para evitar que existan fugas. Los sistemas presurizados requieren sellos de alta temperatura para evitar problemas en la operación. (WENTZ, 1969)

3.2.4 Suministro de aire

La operación de incineración implica la reacción de combustión de los componentes con aire. Normalmente el aire suministra el oxígeno necesario para asegurar la combustión completa. (WENTZ, 1969)

3.2.5 Materiales de construcción

Los incineradores se construyen con materiales que resistan las condiciones de operación. Estos materiales pueden ser desde acero ordinario hasta aleaciones muy sofisticadas. Es necesario definir las propiedades físicas y químicas de los desechos para seleccionar adecuadamente los materiales de construcción que aseguren una larga vida útil al incinerador y minimicen los problemas de mantenimiento. (WENTZ, 1969)

3.2.6 Aspectos adicionales

Hay numerosos aspectos adicionales que deben considerarse en la planeación de la destrucción térmica. El sistema de alimentación debe estar apropiadamente diseñado de acuerdo al tipo de residuo peligroso. (KIANG, 1982)

La introducción de los residuos sólidos al incinerador consta de cuatro etapas (Figura 3.5). Los residuos se depositan en un pozo de almacenamiento donde se homogenizan los residuos procedentes de diferentes fuentes. Para el manejo de residuos peligrosos este pozo debe mantenerse a una presión negativa. Los gases pasan a través de un filtro de carbón activado que remueven los materiales orgánicos peligrosos. Estos gases pueden usarse también como combustible en el incinerador. (KIANG, 1982)

Para transportar los residuo a la tolva se utilizan grúas principalmente grúas monoriel, que en el caso de residuos peligrosos se operan automáticamente.

La tolva de carga se utiliza para alimentar los residuos al incinerador. Esta tolva está conectada al horno a través de los canales de carga. La descarga del residuo dentro del horno puede hacerse por gravedad, por vibraciones o por mecanismos de pistones o reciprocantes. Debido a que el canal de carga se encuentra próximo al horno está expuesto a calor extremo, por lo que frecuentemente se encuentra encharcado con agua.

Los lodos y suspensiones residuales se bombean a través de tuberías. Los residuos llegan a un tanque de almacenamiento donde se mezclan antes de pasar a una estación de bombeo. Existe una línea de circulación al tanque de almacenamiento (Figura 3.6a). Los lodos pesados se introducen al incinerador por medio de un alimentador de tornillo (Figura 3.6b).

Un sistema típico de manipulación de residuos líquidos consta de un tanque de almacenamiento provisto de mezcladores mecánicos o neumáticos para evitar la estratificación de los desechos. Se utiliza una bomba para transportar el residuo líquido al punto de inyección. Existe una línea de recirculación para prevenir la estratificación de los líquidos dentro de la tubería, figura 3.7. El inyector atomizador usado para introducir el residuo a la zona de combustión o a las cámaras de oxidación, es un equipo crítico. Las principales razones de la inyección del líquido en forma de rocío son el rompimiento del residuo líquido en finas gotas e introducir el líquido en un lugar específico dentro del incinerador.

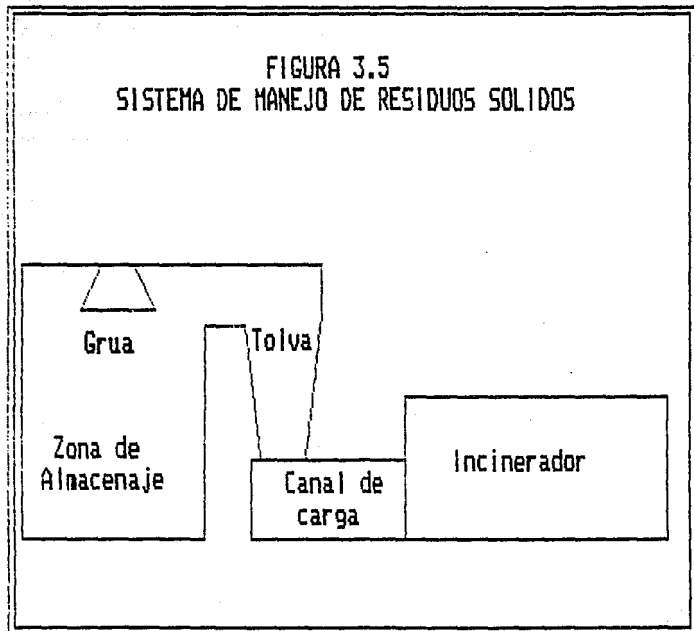
Los sistemas de destrucción térmica deberán estar aislados con materiales refractarios para que operen eficientemente a altas temperaturas. La selección del material refractario se basa en las propiedades a la temperatura de operación del incinerador. Los incineradores operan con ciclos de calentamiento y enfriamiento lo que produce esfuerzos térmicos en el material. (WENTZ, 1980)

Las características de abrasión y erosión de los residuos incinerados pueden desgastar el material refractario del incinerador. Este material está sujeto a las reacciones entre los residuos y subproductos. Por lo que, debe ser versátil y capaz de resistir el ataque físico y químico.

La selección del material refractario apropiado ayuda a proporcionar un ambiente seguro para los empleados, ya que reduce el peligro potencial de quemaduras y exposición al calor.

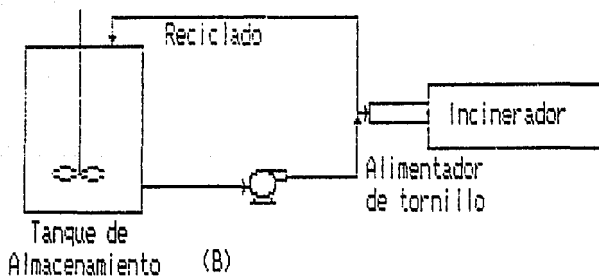
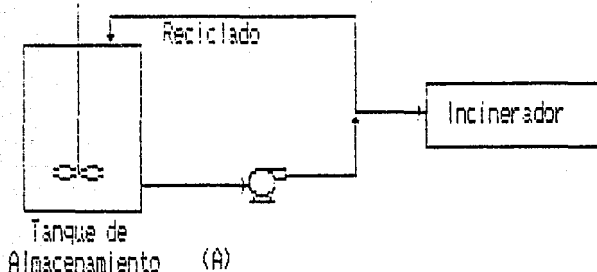
Se ha desarrollado una gran variedad de materiales refractarios para sistemas de incineración. Los más comunes son arcilla refractaria, alúmina, sílica, cromo, magnesita y otros óxidos.

FIGURA 3.5
SISTEMA DE MANEJO DE RESIDUOS SOLIDOS



Fuente: Kiang, 1982 . Hazardous Waste Processing Technology

FIGURA 3.6
INTRODUCCION DE LODOS Y SUSPENCIONES

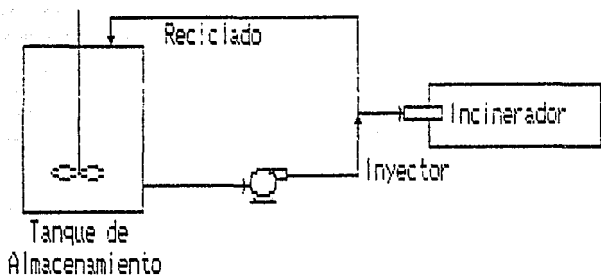


(A) Sistema de alimentacion tipico

(B) Sistema de alimentacion para lodos pesados

Fuente: Kiang, 1982. Hazardous Waste Processing Technology

FIGURA 3.7
SISTEMA DE MANEJO DE RESIDUOS LIQUIDOS



Fuente: Kiang, 1982, Hazardous Waste Processing Technology

En el diseño de un incinerador debe tratarse de obtener las condiciones óptimas para la combustión. El tiempo de residencia y la turbulencia generalmente se fijan por la configuración de la cámara de combustión; la temperatura y el exceso de aire se controlan durante la operación. Los siguientes aspectos son importantes en el diseño: (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

- El volumen de la cámara de combustión debe ser suficiente para contener el residuo y para proporcionar un tiempo de residencia adecuado a la fase gas.

- La temperatura debe mantenerse alta.

- La cámara de combustión debe alcanzar una turbulencia y mezclado máximos por medio de ventiladores y quemadores.

IV. TECNOLOGIAS DE PROCESAMIENTO TERMICO

La destrucción térmica de residuos peligrosos involucra la exposición controlada del residuo a altas temperaturas (normalmente mayores a 900°C) en un ambiente oxidante.

Los sistemas diseñados y operados adecuadamente permiten la destrucción de los componentes orgánicos peligrosos, reduciendo el volumen del residuo y en algunos casos recuperando la energía o algunos subproductos como son ácido sulfúrico o clorhídrico. Es por esto que los sistemas de destrucción térmica han resultado ser una alternativa mas conveniente que los métodos tradicionales de disposición de residuos como son el entierro, la inyección en pozos profundos, etc. (FREEMAN, 1988)

En el tratamiento de residuos peligrosos es posible utilizar una amplia variedad de tecnologías de procesamiento térmico, pero ninguna de ellas representa la solución para todos los problemas de residuos. Cada tecnología presenta ventajas y desventajas que se deben evaluar para poder seleccionar la mejor opción en cada caso.

Las principales tecnologías basadas en procesos térmicos para residuos peligrosos se describen a continuación:

4.1 INCINERACION

La incineración es un proceso en el cual se utiliza la oxidación térmica para convertir los residuos orgánicos en materiales inorgánicos. Generalmente son candidatos para ser incinerados los residuos orgánicos y orgánicos-inorgánicos. La incineración ofrece los beneficios de reducir el volumen de los residuos, eliminar completamente los contaminantes virales y bacterias nocivas, destruye los componentes orgánicos tóxicos pudiendo aprovechar la energía y recuperar algunos subproductos químicos. (MIANO, 1982)

1.2 INCINERACION CATALITICA

Los sistemas de incineración catalítica se utilizan principalmente para la destrucción de residuos gaseosos. Estos generalmente son sensibles a la temperatura, teniendo una temperatura de operación máxima de 1500^oF. por consiguiente no pueden utilizarse en gases extremadamente ricos. Generalmente, los incineradores catalíticos se usan para residuos que contienen niveles de menos del 75% de hidrocarburos. (KIANG, 1982)

Se han encontrado algunas aplicaciones potenciales de la incineración catalítica en el tratamiento de residuos peligrosos pero no se han podido demostrar comercialmente. Los catalizadores, generalmente, son muy selectivos por lo que, no tienen un espectro amplio de aplicabilidad. (SHUCKROV, 1982)

4.2.1 Características de los catalizadores

Los catalizadores son metales o compuestos metálicos. La operación adecuada del sistema depende de la selección del catalizador. En aplicaciones de incineración los mejores catalizadores son el platino y otros metales preciosos como paladio, iridio, rodio y oro. También se utilizan aleaciones como rodio/platino. Generalmente, el catalizador consiste en partículas muy pequeñas de metal distribuidas uniformemente en la superficie o sobre los acarreadores. Los acarreadores son óxidos metálicos inertes que tienen gran área superficial. Los acarreadores típicos son alúmina, magnesita, asbestos, arcilla, carbón activado, varillas de porcelana y alambres o tiras de metal. La actividad del material catalítico puede incrementarse adicionando otros compuestos como activadores. (KIANG, 1982)

4.2.2 Mecanismo de reacción

La reacción catalítica de la fase gas consiste en los siguientes pasos: (KIANG, 1982)

1. Transferencia de calor de la fase gas y transferencia de masa de los reactivos a la superficie del catalizador.

2. Difusión de los reactivos adsorbidos en el catalizador.
3. Reacción química
4. Difusión y desorción de los productos de reacción
5. Transferencia de calor de la fase gas y transferencia de masa de los productos que abandonan la superficie del catalizador.

El proceso más lento de estos controla la velocidad de reacción general. En aplicaciones de incineración catalítica la transferencia de calor es importante por que el proceso es exotérmico.

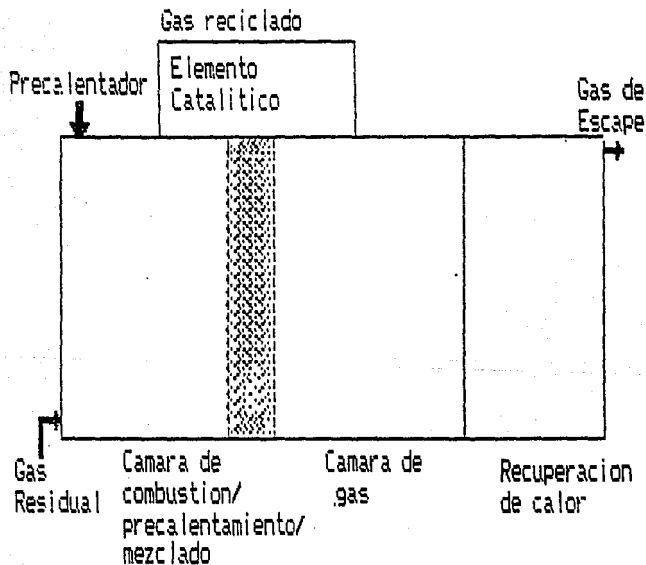
4.2.3 Diseño del proceso

El funcionamiento de un incinerador catalítico no solo depende del catalizador utilizado, sino también de la geometría del equipo y del elemento catalítico, de la temperatura del incinerador, de la composición y el tipo de residuo, del flujo de gas y de la profundidad del lecho catalítico. (KIANO, 1982)

La velocidad del fluido es normalmente de 10 a 20 ft/seg. La forma del catalizador se selecciona para obtener el diseño óptimo del equipo. La profundidad del lecho depende de la caída de presión máxima permisible y la temperatura de incineración se fija por requerimientos de eficiencia de destrucción.

El gas que fluye por el reactor catalítico debe calentarse hasta la temperatura de iniciación de la reacción. Las reacciones que ocurren en el lecho catalítico liberan una cantidad de calor considerable, por lo tanto el gas que abandona el reactor se encuentra a una temperatura suficiente para precalentar el gas de entrada hasta la temperatura de iniciación de reacción. Si el calor liberado no alcanza a precalentar el gas hasta la temperatura requerida es necesario utilizar una fuente adicional.

FIGURA 4.1
 PROCESO BASICO DE INCINERACION CATALITICA



Fuente: Cheremisinoff, 1985. Industrial and Hazardous Wastes

Generalmente, antes de que se introduzcan los residuos gaseosos, el catalizador se activa por medio de un gas tratado (el cual puede ser diferente al gas del proceso) que pasa a través del reactor a la temperatura requerida. (KIANG, 1982)

4.2.4 Desactivación del catalizador

En la practica, la mayoría de los catalizadores se deterioran o pierden gradualmente su actividad. La desactivación del catalizador depende de un gran numero de factores como son el sobrecalentamiento del catalizador y el envejecimiento de este debido a efectos termicos normales como son la recrystalización del catalizador, del acarreador o de ambos. El envejecimiento térmico cambia el area superficial del catalizador y el material de soporte se dispersa, estos efectos son irreversibles. Para prevenir el envejecimiento térmico generalmente se sobrediseñan los requerimientos de catalizador.

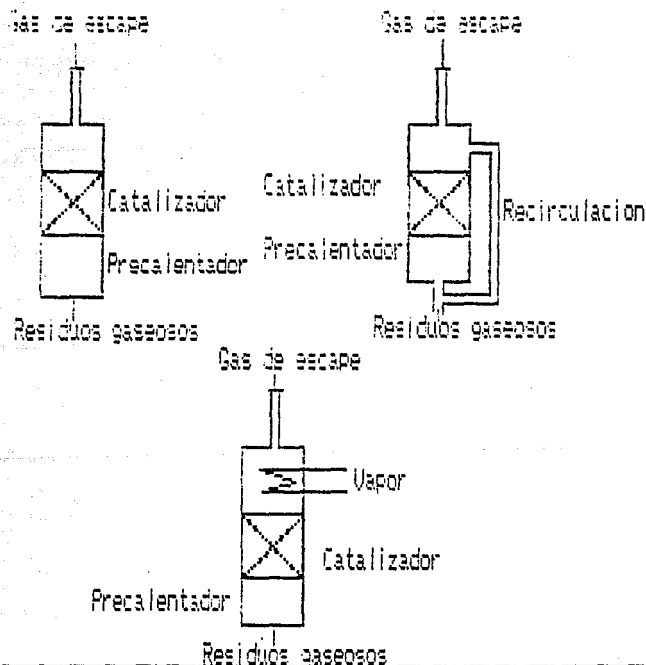
La desactivación puede producirse tambien por la contaminación del catalizador, provocada por la reacción del contaminante con el catalizador. Esto se denomina envenamiento del catalizador y es irreversible. Los contaminantes que se consideran como venenos para el catalizador son plomo, cadmio, antimonio, zinc, fosforo, arsenico y cobre.

Quando los contaminantes de alto peso molecular se acumulan en el catalizador, su actividad disminuye. Esto puede prevenirse utilizando filtros (KIANG, 1982).

4.3 PIROLISIS

La pirolisis es la descomposición térmica de un compuesto en ausencia de oxígeno. En el proceso de pirolisis se oxidan parcialmente los compuestos organicos en forma de un gas combustible, el cual se descarga desde el horno. El gas de bajo contenido de Btu se puede usar como combustible en cámaras de combustión externa con recuperacion de calor. (KIANG, 1982)

FIGURA 4.2
Procesos de incineración catalítica



Fuente: Kiang, 1982. Hazardous Waste Processing Technology

La combustión se desarrolla con un nivel de aire menor al requerido estequiométricamente. Los productos gaseosos provenientes del horno de pirólisis pueden usarse como combustible. El proceso puede ser exotérmico o endotérmico. Para la mayoría de los materiales los procesos son endotérmicos a bajas temperaturas y exotérmicos a altas temperaturas. La parte más importante de estos sistemas es el convertidor pirólítico.

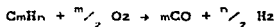
La mayor ventaja que tienen estos sistemas es el potencial de recuperación de subproductos. La pirólisis de residuos peligrosos es relativamente nueva.

Otras ventajas que presentan estos sistemas son que tienen una mayor eficiencia térmica debido a la baja cantidad de aire requerido para el proceso, las emisiones a la atmósfera pueden reducirse considerablemente y suprime la emisión de partículas.

Algunas de las desventajas son la potencial formación de productos cancerígenos y que no funciona adecuadamente con lodos y materiales pastosos a menos que se hayan considerado en el diseño. (MARTIN, 1987)

4.3.1 Química básica

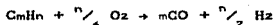
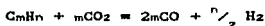
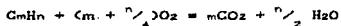
Las reacciones en pirólisis son muy complicadas, sin embargo, el objetivo del proceso es realizar la siguiente reacción:



Bajo estas condiciones, puede formarse carbón libre a partir de la descomposición térmica.



Otras reacciones que ocurren en el proceso de pirólisis son:



Si se utiliza vapor sobrecalentado en el proceso ocurre la siguiente reacción:



El objetivo de la pirólisis es reducir la formación de carbón libre. Esto puede llevarse a cabo por las reacciones secundarias:

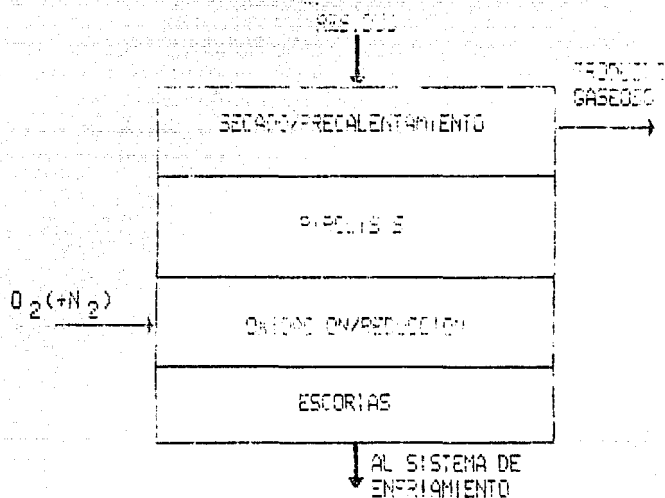


4.3.2 Procesos de pirólisis

Existen dos tipos básicos de procesos de pirólisis: los que producen escorificación y los que no producen escorificación. Los procesos sin escorificación utilizan incineradores convencionales que operan bajo condiciones de aire limitado. Los productos de estos hornos de pirólisis son gases y carbón. El carbón puede mezclarse con otro material residual y realimentarse al horno. Esta tecnología no está completamente desarrollada todavía.

El proceso de pirólisis con escorificación se caracteriza por tener una temperatura de operación muy alta (3000°F). El aire caliente fluye a través de la base del reactor, donde reacciona con una fracción del residuo. El suministro de oxígeno se controla para asegurar una combustión limitada de los productos carbonizados. Estos procesos logran reducciones del volumen del residuo del 95 a 98%, el volumen de descarga de la escoria es muy bajo. También ofrecen una alta eficiencia térmica. (KIANG, 1962)

FIGURA 4.3
REACTOR DE PIRÓLISIS



Fuente: Klana, 1982

4.4 INCINERACION POR OXIGENO

Esta tecnología se ha desarrollado recientemente. en ella se utiliza el oxígeno atmosférico en lugar de aire como oxidante para la incineración. (KIANG, 1982)

El oxígeno del sistema para la disposición de residuos peligrosos tiene una temperatura de 2800°C (5000°F). Este proceso todavía esta en desarrollo.

La ventajas que ofrece son una alta temperatura y por lo tanto una alta eficiencia en un tiempo de residencia reducido y un equipo de tamaño compacto. Los mayores inconvenientes son la selección de materiales de alta temperatura para el horno y un costo relativamente alto de generación del oxígeno. La aplicaciones de esta tecnología esta restringidas por el alto costo de inversión y de operación. (KIANG, 1982)

4.5 CALCINACION

La calcinación es la conversión por descomposición térmica a temperatura elevada de líquidos y suspensiones a materiales sólidos sin ninguna interacción con la fase gas. En este proceso, la estructura física cambia pero no se altera la naturaleza química del sólido. Para una solución acuosa, la primera reacción que ocurre es la vaporización del agua, dejando un material sólido que puede granularse o compactarse.

Este proceso también se utiliza para el tratamiento de sólidos. Los compuestos orgánicos pueden volatilizarse quedando un residuo sólido más estable. Ciertos materiales pueden fundirse y producir materiales cristalinos. Para disminuir la formación de estos se agregan silicatos, fosfatos o borax. (KIANG, 1982)

4.4 INCINERACION POR OXIGENO

Esta tecnología se ha desarrollado recientemente, en ella se utiliza el oxígeno atmosférico en lugar de aire como oxidante para la incineración. (KIANO, 1982)

El oxígeno del sistema para la disposición de residuos peligrosos tiene una temperatura de 2800°C (5000°F). Este proceso todavía está en desarrollo.

Las ventajas que ofrece son una alta temperatura y por lo tanto una alta eficiencia en un tiempo de residencia reducido y un equipo de tamaño compacto. Los mayores inconvenientes son la selección de materiales de alta temperatura para el horno y un costo relativamente alto de generación del oxígeno. Las aplicaciones de esta tecnología están restringidas por el alto costo de inversión y de operación. (KIANO, 1982)

4.5 CALCINACION

La calcinación es la conversión por descomposición térmica a temperatura elevada de líquidos y suspensiones a materiales sólidos sin ninguna interacción con la fase gas. En este proceso, la estructura física cambia pero no se altera la naturaleza química del sólido. Para una solución acuosa, la primera reacción que ocurre es la vaporización del agua, dejando un material sólido que puede granularse o compactarse.

Este proceso también se utiliza para el tratamiento de sólidos. Los compuestos orgánicos pueden volatilizarse quedando un residuo sólido más estable. Ciertos materiales pueden fundirse y producir materiales cristalinos. Para disminuir la formación de estos se agregan silicatos, fosfatos o borax. (KIANO, 1982)

4.5.1 Descripción del proceso

La calcinación es un proceso continuo que opera a alta temperatura y a presión atmosférica. Se produce una reducción en el volumen de aproximadamente 90% en el caso de líquidos y del 50 al 70% en el caso de lodos inorgánicos. En la calcinación de sólidos solo ocurre una pequeña disminución de volumen debida a la volatilización de los compuestos orgánicos. En todos los casos, el material sólido obtenido es mucho más fácil de manejar y menos tóxico.

En el proceso de calcinación se utilizan hornos de cemento para tratar residuos químicos industriales tóxicos. Por lo general, las temperaturas de calcinación son de 900^o a 1600^oC y el tiempo de residencia del gas a 1600^oC es de 15 a 30 segundos. (KIANG, 1982)

Los principales equipos de calcinación son:

- Calcinador de hogar abierto
- Calcinador de horno rotatorio
- Calcinador de lecho fluidizado

4.5.1.1 CALCINADOR DE HOGAR ABIERTO

Este es el más simple de los equipos, pero también el menos eficiente por la dificultad que representa el exponer el material a los gases calientes. Se utilizan brazos agitadores para exponer constantemente la superficie fresca del sólido o suspensión al gas. Los hogares superiores se utilizan para secado o precalentamiento del material, los intermedios son los más calientes y donde ocurre la calcinación completa y los hogares inferiores se usan para enfriar el producto antes de descargarlo. (KIANG, 1982)

4.5.1.2 CALCINADOR DE HORNO ROTATORIO

Un horno rotatorio consiste en un tubo de metal recubierto con material refractario con un espesor que puede ser mayor a 14 ft de diametro. El tubo esta inclinado hacia la fuente de combustion y gira continuamente por medio de un mecanismo externo. Debido a la inclinación el material parcialmente calcinado viaja a lo largo del tubo, incrementandose la temperatura y finalmente se descarga cerca de la fuente de calor. (KIANO, 1982)

4.5.1.3 CALCINADOR DE LECHO FLUIDIZADO

El calcinador de lecho fluidizado es el mas moderno y presenta muchas ventajas para el tratamiento de liquidos y suspensiones. El principio de fluidización consiste en pasar un gas a través de una cama de particulas pequeñas a un velocidad suficiente para que estas flotes. Esto provoca que la cama se expanda hasta que la fuerza de flotación del flujo de gas este en equilibrio con la fuerza gravitacional. El aire fluidizante precalentado se introduce a través de orificios distribuidos uniformemente en el fondo del lecho. La velocidad del fluido es de 1 a 2 ft/seg para tamaños de particulas de 0.3 a 0.8 mm. El material se expone al contacto aire-gas con una alta turbulencia, la cual provoca la volatilización de los liquidos y la calcinacion completa. Generalmente, el tiempo de residencia es de 30 a 60 minutos. (KIANO, 1982)

4.6 DESTILACION

Los sistemas de destilación se utilizan para separar, purificar y recuperar los componentes organicos del residuo.

La destilación para el tratamiento de residuos peligrosos complejos es muy limitada debido al alto costo y los requerimientos de energia. (SHUCKROW, 1982)

4.6.1 Descripción de los procesos

4.6.1.1 DESTILACION DISCONTINUA

La destilación discontinua es una operación que se realiza en una etapa de equilibrio. El líquido se encuentra a la temperatura de ebullición, el vapor se condensa y se recolecta en un acumulador hasta que se alcanza la concentración deseada. El líquido dentro del recipiente disminuye su volumen debido a la pérdida de los componentes más volátiles, la concentración del líquido de fondos puede ser un parámetro para controlar la operación.

El proceso consiste en un recipiente que constituye una etapa de equilibrio, la adición de un condensador y el reciclado del vapor condensado se considera una segunda etapa de equilibrio. (KIANG, 1982)

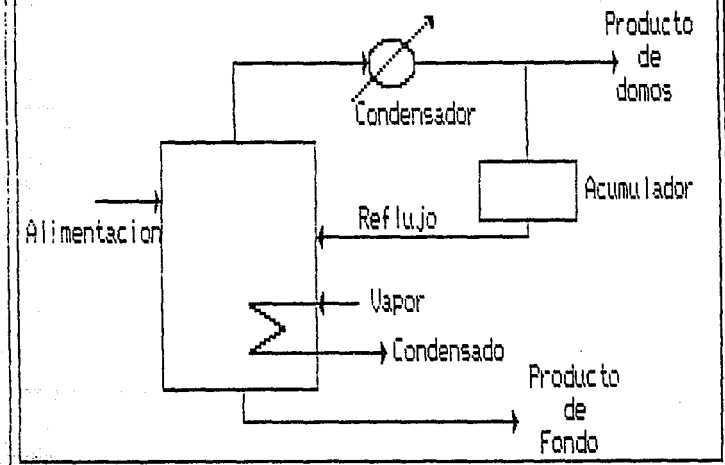
4.6.1.2 DESTILACION CONTINUA

En este proceso una corriente se alimenta continuamente a la columna. La columna contiene platos o empaques que constituyen determinadas etapas de equilibrio. El vapor de fondos se condensa y almacena en un acumulador y se alimenta continuamente al plato superior de la columna. En los fondos el líquido pasa a un rehedidor, cuya función es recibir el líquido del plato inferior y regresar una porción de este en forma de vapor. (KIANG, 1982)

4.6.1.3 DESTILACION AZEOTROPICA

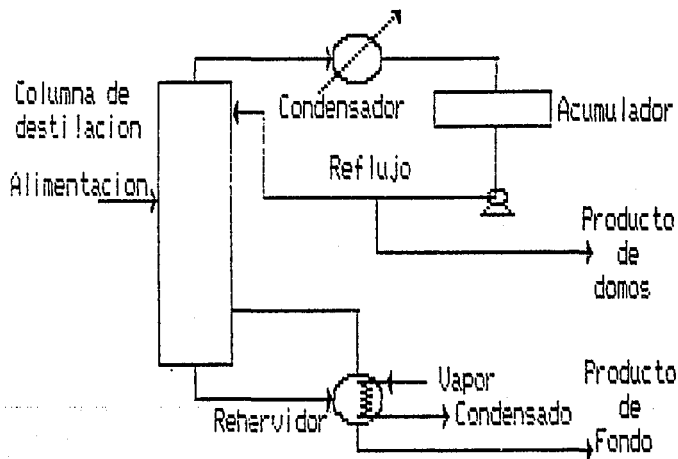
Un azeotropo es una mezcla líquida que mantiene un punto de ebullición constante y produce un vapor con la misma composición de la mezcla en ese punto, por lo tanto, si continua ebulliciendo a presión constante, no se producirán variaciones en la concentración del líquido ni del vapor. No obstante, si la presión total varía, la composición de azeotropo puede cambiar.

FIGURA 4.4
PROCESO DE DESTILACION DISCONTINUA



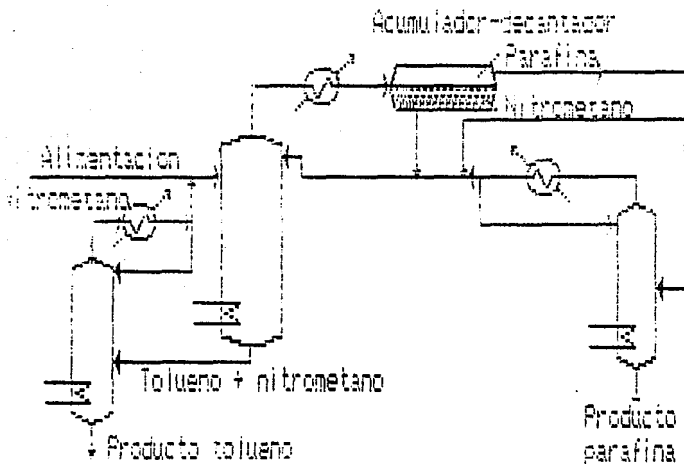
Fuente: Kiang, 1982 . Hazardous Waste Processing Technology

FIGURA 4.5
PROCESO DE DESTILACION CONTINUA



Fuente: Kiang, 1982. Hazardous Waste Processing Technology

FIGURA 4.6
PROCESO DE DESTILACION AZEOTROPICA



Fuente: Kiang, 1982. Hazardous Waste Processing Technology

Este principio se usa en algunos casos para separar mezclas bajo condiciones de presión o vacío. Pero más frecuentemente se adiciona un tercer componente con el fin de formar un nuevo punto de ebullición. La volatilidad del nuevo azeótropo determina la facilidad de separación de la mezcla. (KIANO, 1962)

4.6.1.4 DESTILACION EXTRACTIVA

La destilación extractiva es un método de rectificación multicomponente en el que se adiciona un solvente a una mezcla binaria con el propósito de alterar la volatilidad relativa de los constituyentes originales y permitir la separación. (KIANO, 1962)

4.6.1.5 DESTILACION MOLECULAR

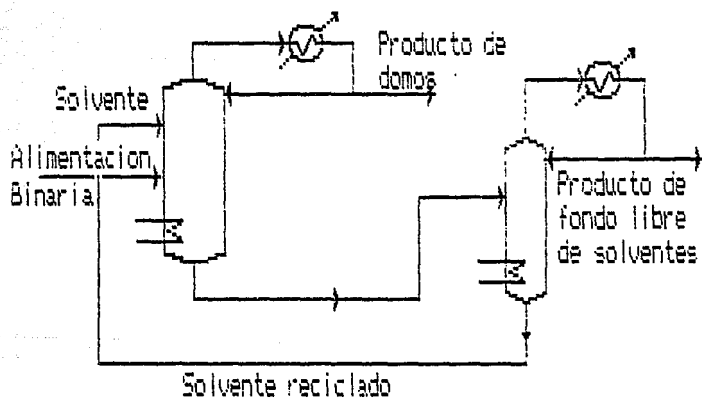
La destilación molecular se realiza a presiones muy bajas (presiones absolutas del orden de 0.003 mmHg). La velocidad neta de evaporación es muy baja debido al hecho de que las moléculas evaporadas se regresan al líquido después de que ocurren colisiones en el vapor. La reducción de la presión ocasiona que el camino libre de la molécula sea muy largo (aproximadamente de 0.4 pulg.). Si la condensación se lleva a cabo a poca distancia de la superficie del líquido vaporizado, las moléculas pequeñas regresan al líquido. (KIANO, 1962)

4.7 DESTILACION CON VAPOR

Este proceso se utiliza para remover agua-inmiscible, componentes volátiles de la corriente de residuo. Se usa también para la recuperación del calor sensible y componentes solubles en agua en la corriente de residuo. (KIANO, 1962)

La destilación con vapor puede aplicarse a cualquier corriente residual que no reaccione o se descomponga en presencia de agua o vapor. El tipo de componentes volátiles que pueden removerse con este proceso son agua-hidrocarburos inmiscibles, agua-hidrocarburos inmiscibles halogenados, agua-hidrocarburos solubles (destilados como azeótropos) y agua-hidrocarburos solubles (no azeótropos).

FIGURA 4.7
PROCESO DE DESTILACION EXTRACTIVA



Fuente: Kiang, 1982. Hazardous Waste Processing Technology

4.7.1 Descripción del proceso

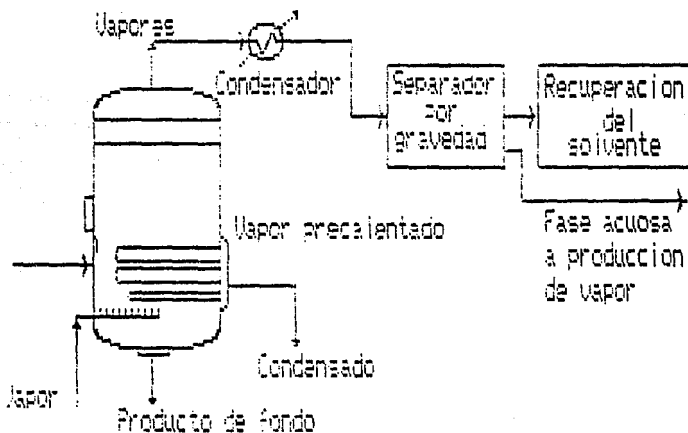
La destilación con vapor puede utilizarse para recuperar o purificar materiales volátiles provenientes de residuos líquidos, sólidos inertes y en algunos casos suspensiones. El material orgánico debe tener una presión de vapor alta.

Cuando se utiliza la destilación con vapor para reducir la concentración de materiales volátiles a muy bajos niveles, se maneja como una operación discontinua o semidiscontinua. En una operación discontinua el residuo se calienta y se burbujea vapor en la fase líquida. En un proceso semidiscontinuo, se alimenta constantemente el residuo durante el tiempo necesario para destilar los componentes volátiles de la mezcla hasta que se obtenga la concentración deseada.

Una de las limitantes de este proceso es la reactividad de los residuos con el agua o el vapor. Algunos hidrocarburos clorados no pueden recuperarse por este proceso, ya que, el agua (o vapor) remueve el estabilizador que normalmente se usa en estos hidrocarburos y se lleva a cabo la formación y/o descomposición del peróxido. (KIANO, 1982)

Generalmente se generan dos corrientes de salida: el residuo agotado (por fondos) y la corriente de vapor y de componentes volátiles (por el domo). La corriente de domos normalmente se condensa y en el caso de agua-compuestos orgánicos inmiscibles se separan para generar una tercera corriente de líquidos inmiscibles que contiene los componentes volátiles casi puros. En el caso de mezclas agua-orgánico soluble, el material orgánico concentrado se recupera por la condensación parcial del vapor y se purifica por evaporación o destilación. (KIANO, 1982)

FIGURA 4.8
SISTEMA DE DESTILACION CON VAPOR



Fuente: Kiang, 1982, Hazardous Waste Processing Technology

4.8 AGOTADORES DE VAPOR

Generalmente estos sistemas se aplican en el tratamiento de aguas residuales que contienen sustancias volátiles. El vapor se utiliza para convertir el material volátil a fase vapor para que posteriormente se procese y se recupere. (KIANU, 1982)

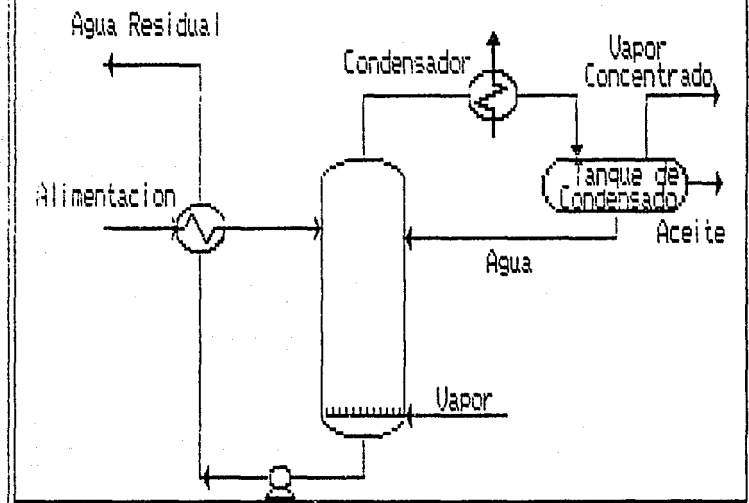
El costo y los requerimientos de energía son altos. Por lo que muchas veces se utiliza como pretratamiento para reducir los componentes volátiles. Los compuestos orgánicos concentrados en la corriente condensada de domos pueden requerir un tratamiento posterior, como puede ser oxidación húmeda. (SHUCKROV, 1982)

Generalmente este proceso es una operación continua en una torre empacada o en una columna de destilación con más de una etapa de contacto vapor/líquido. El agua residual precalentada en un intercambiador de calor entra cerca del domo de la columna y fluye por gravedad a contracorriente del vapor y de los gases (o vapores) orgánicos que ascienden desde el fondo de la columna. El contacto de la corriente residual con el vapor hace que disminuyan gradualmente los componentes volátiles de esta, hasta llegar al fondo de la columna donde el agua residual se calienta por el vapor para reducir la concentración de componentes volátiles hasta su concentración final.

4.9 EVAPORACION

Los sistemas de evaporación se utilizan generalmente para concentrar residuos sólidos de aguas residuales que contengan componentes orgánicos o inorgánicos mediante el secado. El medio de calentamiento puede ser vapor o gases calientes. El equipo puede estar en contacto directo o indirecto con intercambiadores de calor. En algunas ocasiones es necesario un post-tratamiento del condensado.

FIGURA 4.9
SISTEMA DE AGOTAMIENTO CON VAPOR



Fuente: Kiang, 1982. Hazardous Waste Processing Technology

La mayor desventaja del sistema es que los costos de inversión y de operación son altos y tiene altos requerimientos de energía para el tratamiento de residuos peligrosos. Este proceso es más conveniente para el tratamiento de aguas residuales con una concentración de contaminantes orgánicos que para aguas más diluidas. (Stuckrow, 1982)

4.9.1 Tipos de Evaporadores

4.9.1.1 EVAPORACION INDIRECTA

En estos sistemas de evaporación el medio de calentamiento está separado del líquido que va a evaporarse mediante barreras físicas. El medio de calentamiento puede pasar por tubos, serpentines, enchaquetados, etc. Un gran número de evaporadores industriales emplean superficies de calentamiento tubulares.

4.9.1.2 EVAPORACION POR CONTACTO DIRECTO

El medio de calentamiento está en contacto con el líquido. Dentro de este tipo de sistemas se encuentran: evaporación por electrodos sumergidos, rocío directo de vapor y contacto con los gases de combustión.

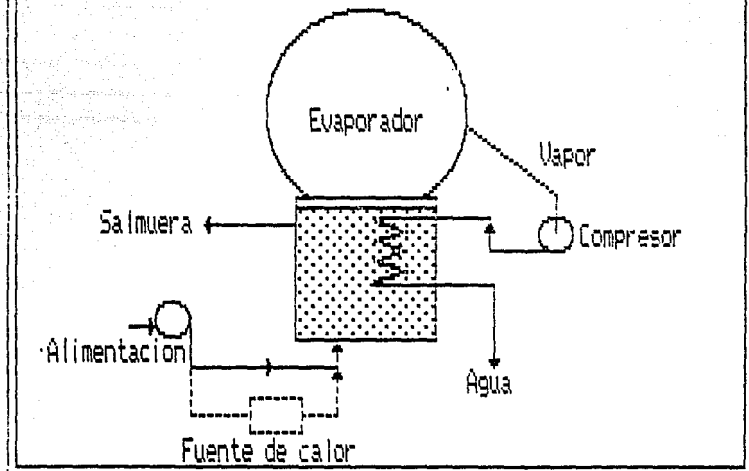
4.9.1.3 EVAPORACION NATURAL

Se usan los elementos o fenómenos naturales para inducir la evaporación, por ejemplo la energía solar o la difusión.

4.10 OXIDACION CON AIRE HUMEDO

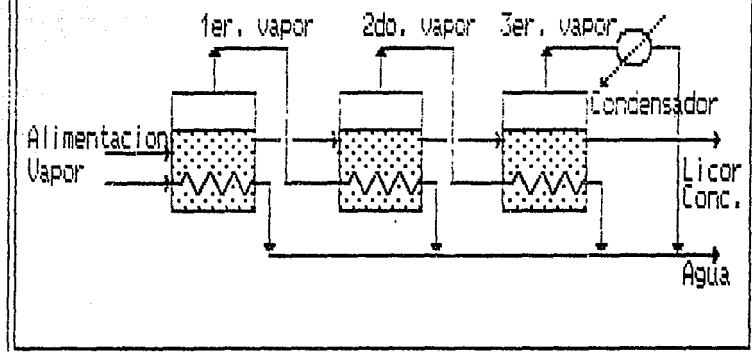
Este proceso se ha aplicado exitosamente a soluciones acuosas con una baja concentración de compuestos oxidables. El proceso opera bajo el principio de que la velocidad de oxidación de los compuestos orgánicos se incrementa a presiones elevadas. Por lo tanto, si se presuriza el residuo orgánico acuoso, se calienta hasta la temperatura apropiada y se introduce oxígeno atmosférico, se produce una reacción de oxidación completa en la fase líquida, la cual destruye la mayoría de los compuestos orgánicos.

FIGURA 4.10
EVAPORADOR DE TERMOCOMPRESION



Fuente: Kiang, 1982 . Hazardous Waste Processing Technology

FIGURA 4.11
SISTEMA DE EVAPORACION MULTIPLE
CON ALIMENTACION DIRECTA



Fuente: Kiang, 1982. Hazardous Waste Processing Technology

El agua funciona como catalizador de la reacción de oxidación que se realiza a baja temperatura (350 a 360 °F) y modera la velocidad de oxidación utilizando el exceso de calor por evaporación. También proporciona un excelente medio de transferencia de calor.

El oxígeno requerido para la reacción de oxidación húmeda es generalmente aire burbujeado a través de la fase líquida. La presión se mantiene a un nivel lo suficientemente alto para prevenir la evaporación excesiva de la fase líquida, normalmente entre 300 y 3000 psig.

4.10.1 Descripción del proceso

La corriente de agua residual que contiene contaminantes oxidables llega al sistema presurizado por medio de una bomba de desplazamiento positivo. El líquido pasa a través de un intercambiador de calor donde se incrementa la temperatura hasta el nivel necesario para que se realice de reacción de oxidación dentro del reactor. El líquido alimentado se mezcla con aire en el fondo del reactor y comienza la oxidación. El calor de combustión se libera, aumentando la temperatura de la mezcla de reacción.

4.10.2 Características del proceso

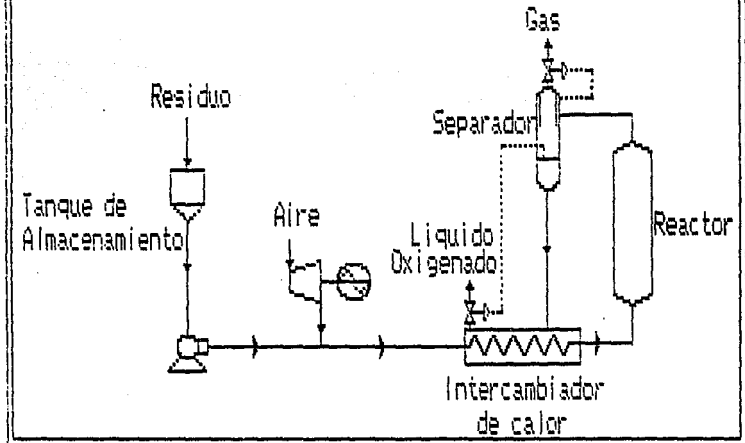
En el proceso de oxidación húmeda existen tres mecanismos básicos: hidrólisis, transferencia de masa y cinética química.
Tabla 4.1

Los cuatro etapas involucrados son:

Hidrocarburo + oxígeno	+ alcohol
Alcohol + oxígeno	+ aldehído
Aldehído + oxígeno	+ ácido
Ácido + oxígeno	+ dióxido de carbono + agua

Las características de los residuos industriales son muy variables pero todos los materiales orgánicos se rompen para formar compuestos intermedios antes de que la oxidación sea completa.

FIGURA 4.12
SISTEMA DE OXIDACION CON AIRE HUMEDO



Fuente: Kiang, 1982. Hazardous Waste Processing Technology

Tabla 6.1 Mecanismos del proceso de oxidación con aire húmedo

Mecanismo de reacción	Efecto típico	Influencia
Hidrolysis	Disolver sólidos División de la cadena de hidrocarburos	pH Temperatura
Transferencia de masa	Disolver sólidos Absorción de oxígeno	Presión Presencia de interfase líquido-gas
Cinética química	Oxidación de compuestos orgánicos	Temperatura Catalizadores

Lang, Hazardous Waste Processing Technology, 1992

4.11 INCINERACION OCEANICA

La incineración oceánica comprende la destrucción térmica de residuos líquidos en el mar en recipientes especialmente diseñados que cuentan con incineradores de alta temperatura. Los principios de operación de estas unidades son los mismos que los de los incineradores de inyección líquida pero no están equipados con sistemas de control de emisiones contaminantes. El gas ácido que se produce en la incineración de residuos clorados se descarga al aire sin llevar a cabo ningún tratamiento para neutralizarlo, ya que el agua de mar tiene una alta capacidad amortiguadora. (RICKMAN, 1991)

El incinerador consiste en dos unidades paralelas, cada una cuenta con una cámara de combustión y una chimenea. El tiempo de residencia típico de estos equipos es de 0.9 segundos a 1200°C. La eficiencia de remoción es de alrededor 99.99%.

Las ventajas de la incineración oceánica son que puede llevarse a cabo lejos de zonas habitadas y que la limpieza del gas no es necesaria debido a que el agua de mar es un excelente diluyente del ácido clorhídrico producido durante el proceso, por lo tanto, resulta ser más económico para materiales con alto contenido de cloro.

Las desventajas son que no puede predecirse totalmente la dispersión de los gases y su incorporación al agua de mar. La transportación de los residuos en tanques representa riesgos adicionales y la disposición de residuos con un contenido alto de metales pesados pueden presentar algunos problemas.

4.12 INCINERACION DE RESIDUOS BIOLÓGICOS INFECCIOSOS

La destrucción de residuos hospitalarios por incineración es una práctica establecida, sanitaria y económica. La incineración reduce el peligro y la contaminación asociados con el manejo y disposición de los residuos hospitalarios. (USEPA. SOLID WASTE HANDLING IN HOSPITALS)

El poder calorífico de los residuos provenientes de hospitales varía de 7.500 a 19.000 Btu/lb. teniendo un porcentaje de humedad del 10%. En la mayoría de los hospitales los residuos son transportados en bolsas de plástico desde el punto en donde se origina hasta el área de incineración. Los requerimientos de separación son mínimos. Sin embargo, los líquidos altamente combustibles deben separarse y manejarse en forma especial. El espacio para el almacenamiento de residuos debe localizarse en un cuarto separado o en la plataforma de carga a el incinerador. (USEPA. SOLID WASTE HANDLING IN HOSPITALS)

Por lo general, los incineradores utilizados para la disposición de este tipo de residuos son incineradores de cámaras múltiples, recubiertos de material refractario y aislados con ladrillo refractario. El equipo auxiliar para aumentar la eficiencia de combustión incluye: sopladores de aire, quemadores de gas y sensores de temperatura.

El tiempo de residencia es de 15 a 20 minutos a una temperatura de operación en las cámaras primaria y secundaria de 760 a 980°C (1400 a 1800 °F). Los quemadores de gas proporcionan el precalentamiento del incinerador y mantienen la temperatura de operación (USEPA. SOLID WASTE HANDLING IN HOSPITALS).

La incineración de residuos hospitalarios reduce el volumen del residuo en un 90% y debido a alta temperatura de operación las cenizas resultantes se consideran estériles (USEPA. SOLID WASTE HANDLING IN HOSPITALS).

V. OPERACION Y CONTROL

La operación y control de los equipos en los procesos térmicos son esenciales para que la destrucción de los materiales peligrosos se lleve a cabo bajo condiciones óptimas. La turbulencia y el tiempo de residencia de la fase gas son constantes para el equipo, por lo que las variables que pueden controlarse son: (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

- Alimentación del residuo
- Exceso de aire
- Temperatura
- Emisiones

5.1 CONTROL DE LA ALIMENTACION DE RESIDUOS Y DE EMISIONES

En los sistemas de incineración y de lavado de gas puede alcanzarse una eficiencia de 99%, sin embargo debe tomarse en cuenta que posiblemente algunos residuos no alcancen a quemarse por completo y escapen a través de la chimenea, el límite de estas omisiones se fija en el diseño del equipo.

La cantidad de estos productos liberados al ambiente se controla por la cantidad y el tipo de residuos alimentados al incinerador y también por la forma en que estos se alimentan. Las características de diseño del equipo fijan los límites máximos de velocidad de alimentación.

Para el control de la alimentación es importante caracterizar los residuos tan completamente como sea posible. La información siguiente es esencial: (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

- Estado físico
- Composición
- Contenido de calor
- Cantidad de cenizas que pueden producirse
- Precauciones que deben tomarse en el manejo del residuo

5.2 CONTROL DE LA TEMPERATURA

Para mantener alta la temperatura debe tratarse de: (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1969)

- Las capacidades calorificas de los residuos no varien considerablemente.
- Si es necesario, utilizar combustible auxiliar
- Asegurar que el aire de combustión proporcione el oxígeno necesario para la oxidación térmica.

Una vez logrados estos puntos, se llevan a cabo los siguientes pasos: (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1969)

- Después de haber asegurado que pueden combinarse diferentes residuos sin riesgo a una reacción química o a una separación de fases, deben mezclarse para mantener un valor calorífico constante.*

- Los residuos líquidos que no puedan mezclarse deben bombearse por separado al incinerador a través de un horno separado.

- Los residuos sólidos se introducen al incinerador por periodos de tiempo para asegurar la combustión estable y un buen acceso de aire.

- Debe existir exceso de aire para asegurar la combustión, el aire de combustión de tener una temperatura mayor a 1000°C. Los sistemas de recuperación de calor se utilizan frecuentemente para precalentar el aire.

- El arranque del equipo que implica elevar la temperatura del incinerador hasta la temperatura de operación, debe efectuarse con combustible limpio. Los residuos deben introducirse cuando se ha alcanzado la temperatura de operación, especialmente si contienen halógenos, azufre, nitrógeno, fósforo o metales.

5.3 ALIMENTACION DE LOS RESIDUOS AL EQUIPO

5.3.1 Alimentación de lodos y líquidos

Las bombas y el material de las tuberías deben ser compatibles con el tipo de desecho procesado. Para la transferencia y alimentación de suspensiones y líquidos se prefieren las bombas de desplazamiento positivo a las bombas centrífugas (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

5.3.2 Atomización de residuos líquidos

Para que se efectúe la combustión de un residuo líquido, este tiene que vaporizarse. Esto se logra atomizando el líquido para formar gotas pequeñas en la zona de calentamiento del incinerador. La atomización de los residuos líquidos puede llevarse a cabo de las siguientes formas: (GANTORELLI, 1989)

- Taza rotatoria
- Atomización a presión fluidos simples
- Atomización con aire a baja presión dos fluidos
- Atomización con vapor a alta presión dos fluidos

5.3.2.1 ATOMIZADOR DE TAZA ROTATORIA

La taza rotatoria consiste en una taza abierta montada sobre una barra hueca. La taza gira rápidamente y el líquido pasa a la barra hueca. Una película delgada del líquido se rompe desde el borde de la taza produciéndose gotas por la tensión superficial. Este tipo de atomización se utiliza en líquidos con un alto contenido de sólidos.

5.3.2.2 ATOMIZADOR A PRESION FLUIDO SIMPLE

En un atomizador a presión fluido simple, el líquido forma un remolino que pasa a través de un orificio con una ranura tangencial. Presiones moderadas del líquido de 7-10 atm proporciona una buena atomización a líquido con viscosidades bajas y moderadas.

5.3.2.3 ATOMIZADOR CON AIRE A BAJA PRESION DOS FLUIDOS

Los atomizadores de dos fluidos son lo más comunes para materiales de alta viscosidad y estos atomizadores pueden ser de baja o alta presión. En los atomizadores de baja presión se utiliza aire de sopladores con presiones de 0.03-0.3 atm para la atomización del líquido.

5.3.2.4 ATOMIZADOR A ALTA PRESION DOS FLUIDOS

Estos atomizadores requieren de aire comprimido o vapor a presiones de 2 a 10 atm. El consumo de aire es de 0.5 a 1.5 m³ por litro de residuo y los requerimientos de vapor son de 0.2 a 0.4 kg por litro.

5.3.3 Alimentación de sólidos

Los sólidos pueden alimentarse neumáticamente, mecánicamente o por gravedad al incinerador. Los alimentadores pueden ser rotatorios, detornillo, por vibración o tipo correa y puede desarrollarse como proceso discontinuo directamente en la cámara de combustión o continuamente utilizando un alimentador tipo correa o de tornillo. (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1969)

5.4 EQUIPOS Y SERVICIOS AUXILIARES

El control de los parámetros anteriores solo es posible con el equipo auxiliar apropiado como tanques de mezclado, de almacenamiento, etc.

Todos los aspectos de la operación deben manejarse en forma segura. Las siguientes áreas requieren de una atención especial: (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

5.4.1 Recepción de residuos

Los residuos pueden transportarse por rieles, caminos y menos comúnmente por tuberías a tanques o tamboros. Es necesario asegurar que el peso y volumen del residuo se registre, el residuo se transfiera del vehículo al tanque o tambor receptor debidamente etiquetado y almacenado. (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

5.4.2 Laboratorio de control

El laboratorio es un aspecto importante para el control debido a que su función es analizar y caracterizar los residuos, revisar la compatibilidad de estos y medir y registrar las emisiones.

5.4.3 Almacenaje y mezclado

La capacidad y el ámbito de los medios de almacenamiento y mezclado determinan el límite en el cual el residuos de entrada puede controlarse. (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

5.4.4 Pretratamiento

El pretratamiento más común es la separación del agua de lodos provenientes de refinerías y de otros residuos acuosos/orgánicos. Otra operación es el secado del líquido del PCB de capacitores y transformadores. (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

5.4.5 Disposición de las cenizas

La incineración no resuelve completamente el problema de la disposición del residuo porque todavía es necesario disponer la ceniza residual descargandola sobre el terreno o en el mar.

Las cenizas se puede también aprovechar en el acondicionamiento de lodos o como auxiliar filtrante en la desecación. En muchos casos, los metales no se degradan y su concentración aumenta en la cenizas por lo que, en algunas ocasiones se mantienen en un confinamiento controlado.

5.4.6 Instrumentación

Algunos aspectos de control pueden complementarse con el uso de computadoras, las cuales automáticamente ajustan la entrada del material, la alimentación de aire de combustión y de combustible auxiliar para mantener las condiciones óptimas, respetar los límites de emisiones y cortar la alimentación en caso de emergencia. Pueden utilizarse termopares de oxígeno y gas (CO y/o CO_2) para medir el exceso de aire y la eficiencia de combustión, la temperatura y emisión de partículas. (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

5.4.7 Personal

Aunque la instrumentación y las microcomputadoras pueden realizar algunas de las funciones de un operador, hasta el equipo más sofisticado requiere de un control y vigilancia cuidadosos. Los operadores deben conocer las bases de la incineración y las condiciones especiales para el manejo de ciertos residuos además de ser capaces de responder en situaciones de emergencia. (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

5.5 MAL FUNCIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS

En la tabla 5.1 se muestra una lista de las posibles fallas que pueden ocurrir en un incinerador y como pueden resolverse.

La base para la operación adecuada y la prevención del malfuncionamiento de los equipos consiste en la formulación de sistemas comprensibles de trabajo, una clara delegación de responsabilidad en los operadores y supervisores y un programa de mantenimiento continuo.

TABLA 5.1 MAL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPOS DE INCINERACION DE RESIDUOS PELIGROSOS

MALFUNCIONAMIENTO	TIPO (*)	INDICACION DE MALFUNCIONAMIENTO	RESPUESTA
Interrupción parcial o completa de la alimentación de residuos sólidos en el quemador	- C	(a) Lectura fuera del rango en el medidor de flujo. (b) Incremento de la presión en la línea de alimentación. (c) Variaciones de temperatura en la zona de combustión.	Detener la alimentación mientras se solucionan el problema. Reiniciar e incrementar la alimentación de combustible auxiliar para mantener la temperatura en la zona de combustión. Continuar operando el equipo de control de contaminantes.
Interrupción parcial o completa de la alimentación de residuos sólidos en un quemador.	- C	(a) Lectura fuera del rango en el medidor de flujo. (b) Incremento de la presión en la línea de alimentación. (c) Variaciones de temperatura en la zona de combustión.	Detener la alimentación solo en el quemador afectado.
Interrupción parcial o completa de la alimentación de residuos sólidos en el horno rotatorio.	RK C	(a) Decremento en la temperatura de combustión en RH. (b) Período de potencia en el sistema de alimentación.	Detener la alimentación. Reiniciar e incrementar la alimentación de combustible auxiliar para mantener la temperatura en la zona de combustión. Continuar operando el equipo de control de contaminantes.
Fugas provenientes de RK debido a la inestabilidad térmica o a la velocidad de alimentación o fallas en los sellos.	RK C	(a) Variación en la presión en el horno. (b) Emisiones visibles provenientes de los sellos.	Detener la alimentación si ocurre durante 10 a 30 min continuadas con la combustión. Evacuar al personal innecesario que se encuentre cerca del horno.
Fallas en el suministro de aire	- RK C	(a) Lectura fuera del rango en el medidor de flujo. (b) Activación de la alarma en el sistema de alarma. (c) Cero amperios en el motor del ventilador.	Detener inmediatamente la alimentación de residuos y combustión. Resolver el problema. Continuar la operación del sistema de control de contaminantes.

TABLA 5.1 MAL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPOS DE INCINERACION DE RESIDUOS PELIGROSOS

MALFUNCIONAMIENTO	TIPO	INDICACION DE MALFUNCIONAMIENTO	RESPUESTA
Temperatura de combustión demasiado alta	- R C	(a) Indicador de temperatura en el panel de control. (b) Alarmas	Revisar la velocidad de alimentación de residuos y combustible. Aumentar el flujo de aire. Revisar los sensores de temperatura. Activación del ventilador si comienza la combustión.
Temperatura de combustión demasiado baja	- R C	(a) Indicador de temperatura en el panel de control. (b) Alarmas	Revisar la velocidad de alimentación de residuos y combustible. Disminuir el flujo de aire. Revisar los sensores de temperatura.
Exceso de gases ácidos en la atmósfera de la chimenea	- R C	(a) Medición por instrumentos. b) Visual	Revisar los sensores de temperatura del exceso de aire. Revisar la activación del sistema de control de contaminantes. Revisar la composición y la calidad de alimentación de residuos.
Flujos de salida con una concentración de CO mayor a 100 ppm. Tercer aire, ventilador de tiro ineficaz	L R K C	(a) Indicador de CO. (b) Sobrecalentamiento de motor. (c) Interrupción en el funcionamiento de ventilador. (d) Caída de presión en el escape.	Revisar y ajustar las condiciones de combustión, especialmente la temperatura del exceso de aire. Si se utilizan dos ventiladores de tiro inducido en serie, reducir los niveles de operación de uno cuando el ventilador operado. En caso de que solo exista un ventilador deberá servirse el combustible de tiro de combustión.
Enfriamiento en la temperatura de gas después del enfriador por la formación que afecta la operación del limitador	- R C	(a) Retorno de flujo de agua al sistema de enfriamiento de agua en la zona de enfriamiento. (b) Incremento en la temperatura de combustión.	Revisar el flujo de agua al sistema de enfriamiento. Revisar la velocidad de operación para que sea respetado el suministro de agua. Revisar las condiciones de combustión, especialmente la temperatura.

VI. LIMPIEZA DEL GAS

6.1 EMISIONES PRODUCIDAS EN LOS PROCESOS TERMICOS

Idealmente los productos de la combustión son dióxido de carbono, vapor de agua y cenizas inertes. En la realidad el proceso de combustión es mucho más complejo e involucra miles de reacciones químicas, catalisis, aerodinámica de la combustión, cinética de las reacciones y transferencia de calor. Esta complejidad se incrementa al considerar las fluctuaciones en las características de alimentación del residuo. Aunque los sistemas de tratamiento térmico se diseñan para lograr la combustión completa nunca se obtiene una combustión ideal, ya que, pueden obtenerse en pequeñas cantidades gran variedad de productos, dependiendo de la composición del residuo y de las condiciones de combustión. Estos productos pueden convertirse en emisiones contaminantes. (RICKMAN, 1991)

6.1.1 Principales contaminantes

6.1.1.1 GASES ACIDOS

Los principales gases ácidos obtenidos durante la combustión son ácido sulfúrico y ácido clorhídrico. Si el residuo contiene una pequeña cantidad de azufre ésta se oxida formando SO_2 durante el proceso de combustión. El SO_2 combinado con la humedad, ya sea atmosférica o del sistema de control de aire húmedo forma el ácido sulfúrico. El ácido clorhídrico se produce cuando el cloro proveniente de cualquier fuente se combina con la humedad. (MANUAL DE INCINERACION, 1989)

6.1.1.2 MONOXIDO DE CARBONO

El gas CO se produce por la combustión parcial del carbono del residuo y el oxígeno del aire de combustión. Esta combustión incompleta puede deberse a que la temperatura sea más baja que la requerida o a que no exista suficiente aire para la combustión.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

VI. LIMPIEZA DEL GAS

6.1 EMISIONES PRODUCIDAS EN LOS PROCESOS TERMICOS

Idealmente los productos de la combustión son dióxido de carbono, vapor de agua y cenizas inertes. En la realidad el proceso de combustión es mucho más complejo e involucra miles de reacciones químicas, catalisis, aerodinámica de la combustión, cinética de las reacciones y transferencia de calor. Esta complejidad se incrementa al considerar las fluctuaciones en las características de alimentación del residuo. Aunque los sistemas de tratamiento térmico se diseñan para lograr la combustión completa nunca se obtiene una combustión ideal, ya que, pueden obtenerse en pequeñas cantidades gran variedad de productos, dependiendo de la composición del residuo y de las condiciones de combustión. Estos productos pueden convertirse en emisiones contaminantes. (CRICKMAN, 1971)

6.1.1 Principales contaminantes

6.1.1.1 GASES ACIDOS

Los principales gases ácidos obtenidos durante la combustión son ácido sulfúrico y ácido clorhídrico. Si el residuo contiene una pequeña cantidad de azufre ésta se oxida formando SO_2 durante el proceso de combustión. El SO_2 combinado con la humedad, ya sea atmosférica o del sistema de control de aire húmedo forma el ácido sulfúrico. El ácido clorhídrico se produce cuando el cloro proveniente de cualquier fuente se combina con la humedad. (MANUAL DE INCINERACION, 1988)

6.1.1.2 MONOXIDO DE CARBONO

El gas CO se produce por la combustión parcial del carbono del residuo y el oxígeno del aire de combustión. Esta combustión incompleta puede deberse a que la temperatura sea más baja que la requerida o a que no exista suficiente aire para la combustión.

El monóxido de carbono se absorbe en la sangre dificultando la asimilación de oxígeno. Altos niveles de CO en la sangre pueden producir la muerte. Sin embargo, la emisiones de CO pueden controlarse fácilmente mediante la operación del sistema a la temperatura, turbulencia y exceso de aire adecuados para una combustión casi completa y la adición de un sistema para limpieza del gas. (MANUAL DE INCINERACION, 1999)

6.1.1.3 COMPONENTES VOLATILES ORGANICOS

Los componentes orgánicos volátiles (COV) se forman por la vaporización de los componentes orgánicos y la combustión incompleta del combustible auxiliar. Los COV puede constituir un peligro para la salud por lo que su emisión debe controlarse.

La minimización de emisiones de COV puede lograrse manteniendo una alta turbulencia y una alta temperatura dentro del incinerador. Normalmente se utiliza un sistema de limpieza húmedo para condensar y absorber algunos COVs si los análisis posteriores indican que es necesario tener un sistema adicional los postquemadores suelen ser muy efectivos. (MANUAL DE INCINERACION, 1999)

6.1.1.4 OXIDOS DE NITROGENO

Los óxidos de nitrógeno se producen al combinarse el nitrógeno de los residuos con el oxígeno a una alta temperatura durante el proceso de combustión.

El efecto más dañino que causan estos óxidos es la formación de un gas ácido en la atmósfera cuando se combinan con la humedad, siendo también un factor que contribuye a la formación de smog.

Un método para el control de emisiones de NO_x es disminuir las variaciones en la temperatura durante la combustión y minimizar el exceso de aire manteniendo una adecuada eficiencia durante el proceso. (MANUAL DE INCINERACION, 1988)

6.1.1.5 MATERIA ORGANICA POLICICLICA

La materia orgánica policíclica (MOP) incluye una gran variedad de sustancias cancerígenas, como son bisfenoles policlorados (PCB), dioxinas (PCDD) y furanos (PCDF).

El método más efectivo de control de MOPs es maximizar la eficiencia de combustión del horno y si se requiere una cámara de postquemado para la destrucción a alta temperatura de estos componentes.

6.1.1.6 PARTICULAS SOLIDAS

Las partículas sólidas contenidas en los gases de escape incluyen metales como zinc y plomo. Una porción de estas cenizas (o todas en el caso del incinerador de lecho fluidizado) se encuentran suspendidas en el gas.

Las partículas pueden provocar problemas respiratorios. Dentro de los métodos de control se encuentran ciclones, tubos Venturi, precipitadores electrostáticos secos y húmedos, filtros y cajas limpiadoras. (MANUAL DE INCINERACION, 1988)

6.1.2 Emisiones dependiendo del tipo de sistema

El control de la emisiones del sistema de tratamiento térmico depende de la naturaleza del residuo, del tipo de sistema y de los parámetros de operación de este.

El factor más importante en la estimación de la generación de emisiones es el tipo del sistema. Algunos de estos son:

6.1.2.1 PIROLISIS

Los productos de combustión de un reactor de pirolisis son ricos en hidrocarburos no quemados, incluyendo ácidos orgánicos y compuestos pesados y ligeros. El gas contiene también una gran cantidad de material particulado. (BRUNNER, 1985)

6.1.2.2 INCINERADOR DE LECHO FLUIDIZADO

Todas las cenizas del residuo y la arena arrastrada del lecho deja el horno a través del gas de escape. (BRUNNER, 1985)

6.1.2.3 INCINERADOR DE HORNO ROTATORIO

La acción de horno es agitar la carga de residuos. La turbulencia provoca una corriente de aire altamente cargado de partículas. (BRUNNER, 1985)

6.1.2.4 HORNO DE CEMENTO

A menos de que la temperatura dentro del incinerador sea suficientemente alta, el residuo no alcanzara la combustión completa, liberándose material particulado y compuestos orgánicos no quemados en la corriente de gas de escape. Aun con altas temperaturas, el gas de escape requiere de sistemas de control de emisiones. (BRUNNER, 1985)

6.1.2.5 INCINERADOR DE MULTICAMARAS

Debido a los impedimentos en el acceso del flujo de gas, la mayoría de las partículas de la corriente gaseosa se precipitan. Por lo tanto, la turbulencia tiende a incrementar el agotamiento de combustible de los compuestos orgánicos dentro del gas de salida.

6.1.2.6 INCINERADOR DE AIRE CONTROLADO

La agitación del residuo es mínima y la cámara de combustión secundaria proporciona un agotamiento controlado del combustible de los productos de combustión. (BRUNNER, 1965)

6.2 LIMPIEZA DEL GAS

El objetivo del limpiar el gas es remover las partículas y los contaminantes. El equipo de limpieza del gas no puede operar a las elevadas temperaturas del gas emitido por el horno, por lo que es necesario reducir esta temperatura a menos de 300°C. Esto puede efectuarse por medio de esprayado con agua o con un sistema de recuperación de energía. El esprayado con agua incrementa el volumen de los gases de salida por la adición de vapor de agua, pero también se facilita la remoción de algunas partículas y de acidez durante el enfriamiento del gas. (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1969)

Una vez efectuado el enfriamiento el sistema consiste de dos etapas: remoción de partículas y de especies ácidas.

6.2.1 Remoción de partículas

La remoción de partículas de los gases enfriados puede alcanzarse por cualquiera de los siguientes métodos: (ROYAL COMMISSION ON ENVIRONMENTAL POLLUTION, 1965)

- Ciclones
- Limpiadores húmedos, incluyendo venturi, torres empacadas o torres de esprayado
- Filtros bolsa
- Precipitadores electrostáticos

Los ciclones se utilizan generalmente en calentadores industriales y hornos de cemento, pero rara vez se encuentran en incineradores de residuos peligrosos. La eficiencia de colección de partículas es baja.

Los limpiadores húmedos se utilizan en unidades grandes. La eficiencia de colección es menor en los venturi y mayor en las torres empacadas. Se usa agua como líquido de limpieza, por lo que se incrementa el volumen de salida, el agua puede descargarse en un paso simple o recircularse en el sistema de limpieza (Figuras 6.1 y 6.2).

Los precipitadores electrostáticos y los filtros bolsa representan un alto costo de inversión. Los filtros bolsa tienden a obstruirse, especialmente en presencia de gases húmedos y su mantenimiento es costoso. En incineradores de residuos peligrosos el uso de estos sistemas es limitado. En los precipitadores electrostáticos la eficiencia de colección depende de la resistividad, siendo más baja para partículas de alta resistividad. La mayoría de los precipitadores electrostáticos que operan en incineradores de residuos peligrosos son de tipo seco.

En la tabla 6.1 se presenta un cuadro comparativo de los distintos dispositivos de remoción de partículas.

6.2.2 Gases ácidos y metales volátiles

Para la absorción de gases ácidos y remoción de partículas volátiles pueden usarse cualquier tipo de limpiadores húmedos, mediante unidades separadas para cada función.

La remoción de ácido clorhídrico excede el 99% y la del dióxido de azufre se aproxima al 80%. Los metales volátiles como mercurio, selenio y cadmio, se condensan fuera de la corriente de gas por la reducción de la temperatura en el limpiador húmedo. Estos metales se transfieren a un limpiador de agua.

Los ciclones se utilizan generalmente en calentadores industriales y hornos de cemento, pero rara vez se encuentran en incineradores de residuos peligrosos. La eficiencia de colección de partículas es baja.

Los limpiadores húmedos se utilizan en unidades grandes. La eficiencia de colección es menor en los venturi y mayor en las torres empacadas. Se usa agua como líquido de limpieza, por lo que se incrementa el volumen de salida, el agua puede descargarse en un paso simple o recircularse en el sistema de limpieza (Figuras 6.1 y 6.2).

Los precipitadores electrostáticos y los filtros bolsa representan un alto costo de inversión. Los filtros bolsa tienden a obstruirse, especialmente en presencia de gases húmedos y su mantenimiento es costoso. En incineradores de residuos peligrosos el uso de estos sistemas es limitado. En los precipitadores electrostáticos la eficiencia de colección depende de la resistividad, siendo más baja para partículas de alta resistividad. La mayoría de los precipitadores electrostáticos que operan en incineradores de residuos peligrosos son de tipo seco.

En la tabla 6.1 se presenta un cuadro comparativo de los distintos dispositivos de remoción de partículas.

6.2.2 Gases ácidos y metales volátiles

Para la absorción de gases ácidos y remoción de partículas volátiles pueden usarse cualquier tipo de limpiadores húmedos, mediante unidades separadas para cada función.

La remoción de ácido clorhídrico excede el 99% y la del dióxido de azufre se aproxima al 80%. Los metales volátiles como mercurio, selenio y cadmio, se condensan fuera de la corriente de gas por la reducción de la temperatura en el limpiador húmedo. Estos metales se transfieren a un limpiador de agua.

El limpiador de agua puede neutralizarse en el lugar utilizando una solución de hidróxido de sodio. El agua que contiene partículas, sales y especies ácidas se trata por el proceso que requiera el sistema receptor. Si se encuentra presente mercurio u otro metal, es necesario que el agua de limpiado pase a través de un filtro de arena, antes de liberarse al cuerpo receptor (ríos, lagos, etc). (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1969)

6.2.3 Aspiradores y chimeneas

El ventilador eductor aspira el aire del sistema y produce una presión negativa en el horno (aproximadamente de 10 a 20 mm de agua en el postquemador) minimizando las emisiones de este. El diámetro y la altura de la chimenea deben asegurar que los gases fluyan con suficiente velocidad. (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1969)

6.2.4 Postquemadores

Los postquemadores son combustores simples empleados para destruir (por oxidación) los hidrocarburos de la cámara de combustión primaria. Existen tres tipos de postquemadores: de flama directa, térmicos y catalíticos. Los de flama directa y térmicos son similares pero destruyen los vapores orgánicos por diferentes métodos. En un postquemador de flama directa un alto porcentaje de gases orgánicos pasa directamente a través de la flama. En una unidad térmica los gases permanecen en una atmósfera de oxidación a alta temperatura. Los postquemadores catalíticos destruyen los materiales combustibles en bajas concentraciones, por lo general los agentes catalíticos son metales nobles como platino y paladio, ésta tecnología no se usa aún en incineración de residuos peligrosos. (MARTIN, 1987)

6.2.5 Proceso de Limpido Completo del Gas

El limpiado completo del gas consiste en el enfriamiento y/o sistema de recuperacion de energia, una unidad de remoción de partículas seguida por un limpiador para absorber gases acidos, un eliminador de niebla o un recalentador, un ventilador aductor y la chimenea. Algunos de estos equipos son opcionales como lo son el eliminador de niebla y el recalentador, así como en algunas unidades pequeñas en que no se producen de gases nocivos, no es necesario instalar un absorbedor de gases. En los sistemas que operan con residuos que se que man rápidamente o son explosivos es necesario elevar levemente la presión dentro del horno. (WORLD BANK TECHNICAL PAPER, 1989)

En la figura 6.3 se muestra un diagrama del proceso de incineración y limpiado del gas.

6.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIONES

6.3.1 Ventajas de postquemadores térmicos y de flama directa (MARTIN, 1987)

1. Los contaminantes orgánicos existentes después de la incineración primaria se destruyen.
2. Permiten que la operación del incinerador sea mas flexible.

6.3.2 Desventajas de postquemadores térmicos y de flama directa

1. Los requerimientos de combustible auxiliar incrementan los costos.

6.3.3 Ventajas de postquemadores catalíticos

1. Los postquemadores catalíticos operan a temperaturas relativamente bajas comparadas con otros postquemadores y en algunas ocasiones el costo de operación es menor.

2. El gas limpio producido es más apropiado para unidades de recuperación de energía.

6.3.4 Desventajas de postquemadores catalíticos

1. La combustión catalítica ocurre a temperaturas mayores de 800°C (1500°F).

2. El sistema catalítico es susceptible de envenenarse.

3. El catalizador requiere de limpieza y tiene que ser reemplazado eventualmente.

4. Los costos de mantenimiento son altos.

6.3.5 Ventajas de torres espreadoras

1. La absorción del gas y la remoción de partículas ocurre simultáneamente.

2. Las torres espreadoras son apropiadas para condiciones de alta temperatura, humedad y concentración de partículas.

3. El diseño es simple.

6.3.6 Desventajas de torres espreadoras

1. La alta eficiencia puede requerir de bombas para las descargas.

2. La colección húmeda de polvo.

3. Las boquillas pueden obstruirse.

4. Requiere de un eliminador de niebla.

5. La eficiencia de colección es menor que la de un limpiador venturi.

6. La eficiencia de absorción es menor que la de la torre empacada.

7. La estructura es grande y voluminosa.

2. El gas limpio producido es mas apropiado para unidades de recuperacion de energia.

6.3.4 Desventajas de postquemadores cataliticos

1. La combustion catalitica ocurre a temperaturas mayores de 800°C (1500°F).
2. El sistema catalitico es susceptible de envenenarse.
3. El catalizador requiere de limpieza y tiene que ser remplazado eventualmente.
4. Los costos de mantenimiento son altos.

6.3.5 Ventajas de torres espreadoras

1. La absorcion del gas y la remocion de particulas ocurre simultaneamente.
2. Las torres espreadoras son apropiadas para condiciones de alta temperatura, humedad y concentracion de particulas.
3. El diseno es simple.

6.3.6 Desventajas de torres espreadoras

1. La alta eficiencia puede requerir de bombas para las descarga.
2. La coleccion humeda de polvo.
3. Las boquillas pueden obstruirse.
4. Requiere de un eliminador de niebla.
5. La eficiencia de coleccion es menor que la de un limpiador venturi.
6. La eficiencia de absorcion es menor que la de la torre empacada.
7. La estructura es grande y voluminosa.

6.3.7 Ventajas de torres empacadas

1. La eficiencia de remoción es alta para contaminantes gaseosos.
2. Las caídas de presión son relativamente bajas.
3. Los principios de diseño y la operación de estos equipos se han estudiado ampliamente.
4. El material del empaque puede ser resistente a la corrosión.

6.3.8 Desventajas de torres empacadas

1. La eficiencia es baja para partículas finas.
2. No son apropiadas para condiciones de alta temperatura y concentración de partículas.
3. Requieren de un eliminador de niebla.
4. El limpiador puede dañarse si fallan las bombas.

6.3.9 Ventajas de precipitadores electrostáticos

1. La colección de polvos puede ser en seco.
2. Las caídas de presión son bajas.
3. El costo de operación es bajo.
4. La eficiencia de remoción la partículas finas es alta.

6.3.10 Desventajas de precipitadores electrostáticos

1. El costo de inversión es alto.
2. La velocidad del flujo varía sensiblemente.
3. La resistividad de la partícula afecta a la remoción y a los costos.
4. Los contaminante gaseosos no pueden removerse por estos equipos.

En el caso de incineración de residuos peligrosos los sistemas más utilizados son gas - aire y gas - fluido orgánico, ya que, aumenta la eficiencia de combustión y reduce los costos de combustible auxiliar. En el diseño de cualquier sistema de recuperación de energía se consideran los siguientes parámetros: (RICKMAN, 1991)

1. La naturaleza química, temperatura y corrosividad de los gases.
2. La cantidad, gravedad específica, tamaño de las cenizas suspendidas en los gases.
3. El tipo de sistema de gas utilizado (a presión o a vacío)
4. Espacio disponible
5. Los requerimientos de combustible adicional durante el arranque, precalentamiento, condiciones de emergencia y de estabilización del horno, etc.
6. Los requerimientos de equipo para producir vapor (sistemas gas - agua)
7. Los requerimientos especiales de los procesos individuales para producir energía.

7.1 SISTEMAS DE RECUPERACION DE ENERGIA

Existen dos diseños básicos para recuperar el calor del residuo: (VESILIND, 1991)

El primero consta de una cámara de combustión de material refractario seguida por un hervidor de residuos.

El segundo diseño es una cámara de combustión de pared de agua seguida de una sección de hervidores de convección.

En un recuperador de calor con sistema de rehervidores de residuos pueden producirse de 1 a 2 kg de vapor/kg de residuo incinerado, recuperando del 60 al 70% del calor de este. El sistema de horno de pared de agua presenta algunas ventajas pero también tiene algunas limitaciones.

En el caso de incineración de residuos peligrosos los sistemas mas utilizados son gas- aire y gas - fluido orgánico, ya que, aumenta la eficiencia de combustión y reduce los costos de combustible auxiliar. En el diseño de cualquier sistema de recuperación de energía se consideran los siguientes parámetros: (RICKMAN, 1991)

1. La naturaleza química, temperatura y corrosividad de los gases.
2. La cantidad, gravedad específica, tamaño de las cenizas suspendidas en los gases.
3. El tipo de sistema de gas utilizado (a presión o a vacío)
4. Espacio disponible
5. Los requerimientos de combustible adicional durante el arranque, precalentamiento, condiciones de emergencia y de estabilización del horno, etc.
6. Los requerimientos de equipo para producir vapor (sistemas gas - agua)
7. Los requerimientos especiales de los procesos individuales para producir energía.

7.1 SISTEMAS DE RECUPERACION DE ENERGIA

Existen dos diseños básicos para recuperar el calor del residuo: (VESILIND, 1991)

El primero consta de una cámara de combustión de material refractario seguida por un hervidor de residuos.

El segundo diseño es una cámara de combustión de pared de agua seguida de una sección de hervidores de convección.

En un recuperador de calor con sistema de rehervidores de residuos pueden producirse de 1 a 2 kg de vapor/kg de residuo incinerado, recuperando del 60 al 70% del calor de este. El sistema de horno de pared de agua presenta algunas ventajas pero también tiene algunas limitaciones.

El sistema consiste básicamente de tubos de acero soldados para formar una pared continua. El agua o el vapor circula por los tubos. Los rehervidores reducen la temperatura de los gases de escape. Los hornos de pared de agua requieren de 80 a 100% de exceso de aire.

Existen muchos problemas asociados con la generación de energía en los sistemas de pared de agua. Los costos de inversión y de operación son muy altos para cantidades de residuos mayores de 500 tons/día. Pueden existir problemas operacionales en la producción de vapor por este sistema, por ejemplo, de corrosión en los tubos del rehervidor producida por ácido clorhídrico o por las altas velocidades del gas. (VESILINO, 1961)

En la tabla 7.1 se encuentra una descripción de los diferentes métodos de recuperación de energía.

7.2 GENERACION DE VAPOR

La generación de vapor por la recuperación de calor del incinerador es mucho más frecuente que la generación de agua o aire caliente, ya que el vapor es más versátil y una libra de vapor contiene mucho más energía que una libra de agua o aire calientes.

7.2.1 Temperatura aproximada

Para cualquier intercambiador la temperatura de aproximación t_x es la diferencia entre la temperatura del medio de calentamiento t y la temperatura del gas de combustión t_o a la salida del hervidor. (BRUNNER, 1964)

$$t_x = t_o - t \quad (7.1)$$

Entre menor sea t_x , mayor será la eficiencia del intercambiador. Entre mayor sea el intercambiador t_x será menor, por lo tanto, en un intercambiador infinitamente grande $t_x = 0$ y la temperatura del vapor (o agua caliente) será la misma que la de los gases de combustión.

El sistema consiste básicamente de tubos de acero soldados para formar una pared continua. El agua o el vapor circula por los tubos. Los rehedidores reducen la temperatura de los gases de escape. Los hornos de pared de agua requieren de 30 a 100% de exceso de aire.

Existen muchos problemas asociados con la generación de energía en los sistemas de pared de agua. Los costos de inversión y de operación son muy altos para cantidades de residuos mayores de 500 tons/día. Pueden existir problemas operacionales en la producción de vapor por este sistema, por ejemplo, de corrosión en los tubos del rehedidor producida por ácido clorhídrico o por las altas velocidades del gas. (VESILINO, 1961)

En la tabla 7.1 se encuentra una descripción de los diferentes métodos de recuperación de energía.

7.2 GENERACION DE VAPOR

La generación de vapor por la recuperación de calor del incinerador es mucho más frecuente que la generación de agua o aire caliente, ya que el vapor es más versátil y una libra de vapor contiene mucho más energía que una libra de agua o aire calientes.

7.2.1 Temperatura aproximada

Para cualquier intercambiador la temperatura de aproximación t_x es la diferencia entre la temperatura del medio de calentamiento t y la temperatura del gas de combustión t_o a la salida del hervidor. (BRUNNER, 1964)

$$t_x = t_o - t \quad (7.1)$$

Entre menor sea t_x , mayor será la eficiencia del intercambiador. Entre mayor sea el intercambiador t_x será menor, por lo tanto, en un intercambiador infinitamente grande $t_x = 0$ y la temperatura del vapor (o agua caliente) será la misma que la de los gases de combustión.

En la práctica la temperatura de aproximación utilizada típicamente en un hervidor de residuos es de 37°C (100°F) para obtener gran eficiencia y 65°C (150°F) para diseños económicos.

7.2.2 Calor disponible

El calor disponible de los gases de escape o de combustión está dado por: (BRUNNER, 1964)

$$Q = W (h_{ti} - h_{to}) \quad (7.2)$$

donde Q = Calor disponible de la corriente de gas de combustión

W = Flujo de gas de escape

h_{ti} = Entalpia a la temperatura de salida del incinerador

h_{to} = Entalpia a la temperatura de salida del intercambiador

El gas de escape tiene componentes secos y húmedos. Considerando que el gas seco tiene las mismas propiedades del aire (W_{dg}, h_{a}) y el siendo W_m el contenido de humedad, la ecuación queda:

$$Q = W_{dg} (h_{a1} - h_{a2}) + W_m (h_{m1} - h_{m2}) \quad (7.3)$$

La entalpia a la salida del incinerador debe ser evaluada a t_o

$$t_o = t_x + t \quad (7.4)$$

Conociendo el calor disponible se puede calcular la cantidad de vapor generado.

7.2.3 Generación de vapor

En la figura 7.1 se señala la producción de vapor por medio de un hervidor de residuos. El agua de reemplazo se eleva hasta la temperatura del agua de alimentación por medio de vapor y del calor contenido en el condensado. El condensado se regresa al desaireador que ayuda a liberar el oxígeno disuelto en el agua de alimentación.

Generalmente se emplean tratamientos adicionales para el agua de alimentación para reducir o prevenir incrustaciones y la corrosión del hervidor. Se utilizan suavizadores de agua para remover la mayor parte del calcio y magnesio contenidos en el agua cruda. Las sustancias químicas que se adicionan son: (BRUNNER, 1964)

Sulfito de sodio.- Remueve el oxígeno disuelto que deja el desaireador. También se usa hidrazina a alta presión (1200 psias) en hervidores.

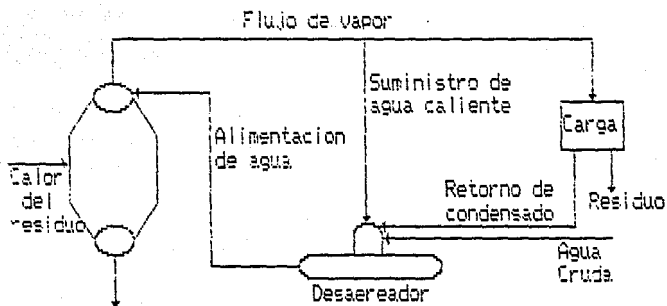
Aminas.- Se utilizan para controlar el pH en el rehervidor. El exceso de alcalinidad (pH mayor de 11) puede acelerar la formación de incrustaciones, mientras que a pH bajos (menores de 6) se puede producir corrosión en los tubos del hervidor. Normalmente se trata de mantener el pH ligeramente alcalino entre 8.0-9.5.

Fosfatos.- Este tratamiento se utiliza para precipitar el calcio y magnesio residual contenido en el agua de alimentación después del suavizado. Ciertos fosfatos actúan como dispersantes previniendo la adhesión del precipitado en las paredes del tubo.

7.3 CONSIDERACIONES FINALES DE LA RECUPERACION DE ENERGIA

La primera decisión que debe tomarse para considerar la recuperación de energía en un sistema de tratamiento térmico es la existencia de un uso o mercado para el calor recuperado. Muchos incineradores son instalados en lugares donde no existe la

FIGURA 7.1
PRODUCCION DE VAPOR



Fuente: Brunner, Incineration Systems, 1984

necesidad de producir vapor o agua caliente, o donde la demanda de estos es solo por temporadas. En estos casos, la inversión en un sistema de recuperación de energía, tal vez no sea conveniente. Debe considerarse cuidadosamente el potencial de recuperación de energía, evaluado en base al retorno de la inversión. (CHEMICAL ENGINEERING, OCT 12 1967)

Junto con el análisis económico debe llevarse a cabo una evaluación de los riesgos técnicos que involucre la recuperación de energía. Si el incinerador maneja residuos con un alto contenido de materiales clorados, por ejemplo, existe mucho más riesgo en la operación de un hervidor de residuos que en el caso de que los residuos no contengan cloro, debido a que el ácido clorhídrico al condensarse, al igual que otros gases ácidos, es extremadamente corrosivo. Esto implica que la temperatura del rehervidor de residuos se mantenga arriba del punto de rocío del ácido clorhídrico (mayor a 300°F), lo cual requiere de muchos cuidados durante la operación.

En sistemas grandes de incineración, el calor recuperado como vapor solo se utiliza para generar energía eléctrica. Sin embargo, el costo de la recuperación de calor incrementa el costo del proyecto. En los incineradores municipales o industriales pequeños, rara vez puede justificarse la generación de energía. En la tabla 7.2 se muestran los costos de inversión típicos para sistemas de hervidores de recuperación de calor del residuo. En la tabla 7.3 se detallan los costos en la generación de electricidad.

La recuperación del calor del residuo y la generación de energía deben considerarse como una posibilidad secundaria de los sistemas de tratamiento térmico para la disposición de residuos.

(CHEMICAL ENGINEERING, OCT 12 1967)

VIII. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES

Existe una gran variedad de incineradores. La figura 8.1 muestra un diagrama de flujo genérico de un incinerador de residuos peligrosos.

En el diagrama se puede observar que la alimentación de aire, residuos, refrigerantes y combustible auxiliar, así como los sistemas de enfriamiento, filtración y análisis de los efluentes gaseosos y cenizas tienen más etapas de proceso que el incinerador, que es la parte más importante del sistema.

En la actualidad existen varias tendencias. Una se dirige hacia sistemas más versátiles susceptibles de manejar sólidos, líquidos o lodos. La otra tendencia de los incineradores es lograr sistemas de lavado en seco de gases ácidos como HCl y SO₂.

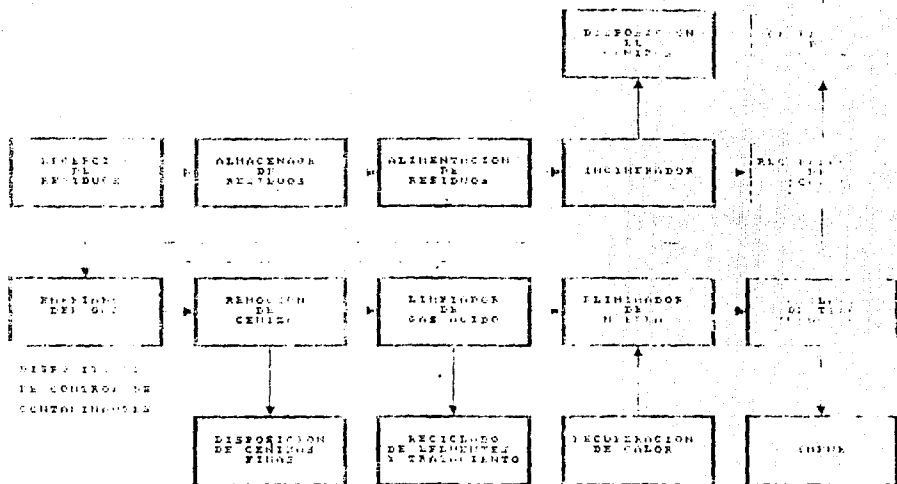
Un sistema de incineración de residuos peligrosos incluye uno o todos de los siguientes componentes: (RICKMAN, 1991)

- Sistema de preparación/alimentación del residuo.
- Cámara de combustión primaria
- Cámara de combustión secundaria
- Sistema de recuperación de energía
- Sistema de control de contaminantes atmosféricos
- Ventiladores y chimeneas
- Sistema de manejo de cenizas

La diferencia más importante entre la incineración de residuos peligrosos y la incineración de residuos no peligrosos reside en la tecnología de la cámara de combustión primaria. Las tres 'Ts' de la combustión -temperatura, tiempo de residencia, turbulencia- son de suma importancia en el control de las condiciones de operación en el incinerador.

FIGURA 6.4

COMPONENTES DE UN PROCESO DE INCINERACION Y DE LIMPIADO



101

Fuente: Richardson, 1991. Handbook of Incineration of Hazardous Waste

Las características de los residuos son parámetros importantes en el diseño de el equipo de preparación/alimentación del residuo. La variación de la velocidad de alimentación al incinerador—y el estado físico de los residuos son factores que afectan el funcionamiento de los incineradores.

Otro aspecto importante en la incineración de residuos peligrosos es el control de las emisiones. Los incineradores deben contar con equipo para disminuir los contaminantes y para asegurar que las partículas que permanezcan en el gas despues del proceso de incineración no escapen a la atmosfera.

Las tecnologías disponibles de incineración incluyen:
(RICKMAN, 1994)

1. Incineradores de horno rotatorio
2. Cámara de combustión de lecho circulante
3. Incineradores de lecho fluidizado
4. Incineradores de inyección líquida
5. Incineradores de aire controlado

8.1 INCINERADORES DE HORNO ROTATORIO

8.1.1. Descripción del sistema

Los hornos rotatorios se usan desde de 1920. Al principio se utilizaron en la industria como un metodo para el secado de sólidos. En 1950 comenzaron a emplearse los hornos rotatorios para la incineración de residuos municipales. A partir de esto, se han desarrollado diseños con aplicación a residuos industriales y peligrosos.

El horno rotatorio se utiliza, en sí, como una cámara de combustión primaria. El horno es una coraza cilíndrica de metal recubierta de material refractario inclinada ligeramente desde el final de la alimentación de sólidos del horno hasta el final de la descarga.

Debido a la rotación de la coraza y a la pendiente los residuos se transportan a través del horno, mejorando el mezclado del residuo con el aire. La velocidad de rotación controla el tiempo de residencia de los residuos dentro del horno. La porción de combustible del residuo se volatiliza conforme los sólidos avanzan a lo largo del horno. Mejorando el mezclado y con el alto tiempo de residencia, se producen cenizas no peligrosas.

Los hornos rotatorios tienen, por lo general, uno o dos quemadores auxiliares, los cuales precalientan el horno hasta la temperatura mínima de operación y proporcionan calor adicional para mantener la temperatura durante la operación. El combustible empleado en los quemadores auxiliares puede ser gas natural, propano, aceite combustible o residuos líquidos de alto poder calorífico.

Se fabrican dos tipos de hornos rotatorios a corriente y contracorriente. En el primero el quemador se localiza en la entrada de aire al final de el horno. La dirección de la inyección de la mezcla aire-combustible es la misma que la del flujo de gas y de sólidos. En el diseño a contracorriente, el quemador se ubica en la entrada de aire al final del horno, pero la dirección de la inyección de la mezcla aire-combustible y del flujo de gas es opuesta al flujo de residuos sólidos. Este diseño permite un mayor control en los dos extremos del horno. La turbulencia provocada por la inyección de la mezcla aire-combustible en el extremo de la descarga de sólidos mejora el proceso de combustión en la cámara de combustión secundaria.

La relación L/D del horno varía en un ámbito de 2 a 10 y la velocidad rotacional es de 1 a 5 ft/min medidas desde la periferia del horno. El tiempo de residencia y la temperatura requeridos para la combustión dependen completamente del residuo. Las temperaturas típicas se encuentran en un ámbito de 800 a 1000 °C (1500 a 1900°F). Los tiempos de residencia para sólidos van de 30 minutos a

3 horas dependiendo de las dimensiones de horno y de la velocidad de rotación, mientras que el tiempo de residencia del gas varía de 1 a 5 segundos dependiendo del volumen del horno y del exceso de aire utilizado.

El calor liberado en los hornos rotatorios varía de 20.000 a 25.000 Btu/ft² h. las capacidades típicas de alimentación de residuos son de 2000 lb/h a 12.000 lb/h para residuos sólidos y de 50 a 300 gal/h para residuos líquidos.

Debido a que la porción combustible del residuo se volatiliza, los gases formados dejan el horno y entran a la cámara de combustión secundaria que está equipada con uno o más quemadores auxiliares que mantienen la temperatura arriba de 1200°C (2200°F).

La cámara de combustión secundaria es un recipiente estacionario recubierto de material refractario y del 30 a 60% del tamaño del horno rotatorio dependiendo del volumen de aire y de los tiempos de retención requeridos. Esta cámara está equipada con baffles internos o sopladores de aire adicional que maximizan la turbulencia y aseguran el mezclado completo de los gases volátiles y el aire de combustión. El tiempo de retención típico para esta cámara es de 2 segundos como mínimo a 1200°C (2200°F).

Los gases calientes que se encuentran en la cámara de combustión secundaria pasan al sistema de recuperación de energía o al sistema de control de contaminantes.

Las cenizas en la descarga del horno y las provenientes del dispositivo de control de contaminantes se recolectan y se enfrían en un contenedor. (RICKMAN, 1991)

8.1.2 Ventajas y desventajas del sistema

Las ventajas del sistema de incineración por hornos rotatorios son: (RICKMAN, 1991)

1. Una gran variedad de residuos peligrosos líquidos y sólidos se pueden incinerar.
2. Los residuos líquidos y sólidos se pueden tratar por separado o en combinación.
3. Algunos materiales se pueden incinerar fundiéndolos.
4. El sistema puede adaptarse a una amplia variedad de mecanismos de alimentación.
5. La alta turbulencia y exposición de los residuos sólidos al aire son características de este sistema.
6. La remoción de cenizas se realiza en forma continua sin interferir con la combustión.
7. No existen partes móviles dentro del horno.
8. El sistema es adaptable para gran variedad de sistemas de control de contaminantes atmosféricos.
9. El tiempo de residencia de los componentes no volátiles se puede controlar por el ajuste de la velocidad rotacional del horno.
10. Los residuos se pueden alimentar directamente en el horno sin necesidad de precalentamiento o mezclado.
11. Se pueden operar a temperaturas en exceso de 1400°C (2500°F) lo que permite la destrucción de componente tóxicos que son difíciles de degradar térmicamente.
12. El control de la velocidad rotacional de el horno permite un rango de operación máximo a mínimo del 50%.

Las desventajas que presentan este tipo de sistemas son: (RICKMAN, 1991)

1. El costo de instalación es alto.
2. Se requieren cuidados en la operación para prevenir daños en el refractario.

3. Los hornos rotatorios frecuentemente operan con altos niveles de exceso de aire.

4. La eficiencia térmica es relativamente baja debido al exceso de aire.

5. El secado de residuos lodos o fundidos puede provocar la formación de escoria.

8.2 CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE LECHO CIRCULANTE

8.2.1 Descripción del sistema

La cámara de combustión de lecho circulante es un sistema de incineración para la destrucción de residuos peligrosos. Las diferencias con otros incineradores son la turbulencia en el lecho de combustión, la operación a temperatura más baja y la inyección de caliza.

La alta turbulencia provoca que el oxígeno circule entre los sólidos en el lecho de combustión, por lo que el material combustible se quema rápidamente a temperaturas relativamente bajas (aproximadamente 1600°F). La baja temperatura de operación limita la formación de óxido de nitrógeno y gases ácidos. La adición de caliza neutraliza a los halógenos y al azufre que se encuentren en los gases ácidos. Estas propiedades de la cámara de combustión de lecho circulante eliminan la necesidad de posquemadores y de limpiadores húmedos.

Las dimensiones típicas de la cámara de combustión son 30 ft de diámetro con espesor de 12 pulg de material cerámico. Existe una recirculación de la corriente de sólidos calientes al punto de alimentación. Los residuos líquidos y lodos se inyectan directamente a la zona de combustión. Los materiales peligrosos se calientan hasta temperaturas de 800° a 1000°C (1450° a 1800°F), esta temperatura se mantiene durante la operación. El tiempo de residencia en la cámara es de 2 segundos para gases a 30 min o más para materiales sólidos.

Los materiales que se alimentan al sistema de cámara de combustión de lecho circulante incluyen contaminantes sólidos, combustible auxiliar y caliza como material absorbente en los casos en los que es necesario controlar las emisiones de gas ácido. Los sólidos y la caliza se alimentan a una velocidad controlada dentro del ciclo de combustión. Los líquidos se introducen directamente a la cámara de combustión.

La velocidad del aire de alta combustión y los sólidos circulantes tienen una temperatura uniforme dentro del ciclo, el cual comprende la cámara de combustión, el ciclón caliente y el circuito de retorno. Durante la operación la cenizas se remueven periódicamente a través de una válvula que se encuentra en la parte inferior de la cámara de combustión que permite que fluyan dentro de un sistema de enfriamiento con agua. Los sólidos se enfrían hasta una temperatura de 180°F (350°F), este sistema está provisto de un transportador. Las partículas pequeñas fluyen debido al flujo de aire.

El gas caliente que se encuentra en la parte superior del ciclón pasa a un enfriador de gases de combustión, las partículas que escapan del ciclón se recolectan en un filtro. La cámara de combustión cuenta con un recipiente para contener los contaminantes de la combustión. El ciclón remueve las partículas de los gases de combustión y las regresa a la cámara de combustión.

El sistema de inducción de aire suministra el aire necesario para la combustión, fluidización y el balance del ciclo.

Los sólidos, el exceso de aire y los gases de combustión entran al ciclón ubicado en la parte superior de la cámara, donde debido a la fuerza centrífuga los sólidos con un tamaño mayor a 50µm se acumulan en la pared del ciclón y caigan por gravedad al circuito de retorno. Estos sólidos se recirculan a la cámara de combustión.

Los sólidos muy finos pasan a través del ciclón junto con los gases de combustión entran al enfriador de gases de combustión. El enfriador de gases de combustión disminuye la temperatura de los gases y de las partículas hasta un rango de 180° a 200°C (350 a 400°F). Las partículas se separan al pasar a través de un filtro de bolsa y caen a través de una válvula rotatoria en el sistema de transportación de cenizas. La máxima caída de presión en la operación normal es de 10 puig de agua.

El enfriador consta de tres secciones. La primera sección es un intercambiador de calor cuya función es reducir la temperatura del gas lo suficiente para eliminar la necesidad de utilizar metales de alta temperatura en la segunda sección.

En la segunda sección se utiliza el calor del residuo para alcanzar la temperatura de combustión del aire, de esta forma, se disminuyen los requerimientos de combustible y se incrementa el rendimiento de los materiales con bajo calor de combustión. El aire es precalentado a 340°C (645°F).

En la tercera sección se controla la temperatura de salida de los gases. El gas se enfría a aproximadamente 180°C (350°F) para prevenir daños en el filtro de bolsa.

El gas que pasa por el enfriador de gases de combustión se encuentra a presión subatmosférica, mientras que el agua de enfriamiento y las corrientes de aire se encuentra en condiciones de presión positivas. (RICKMAN, 1991)

El combustible auxiliar tiene tres funciones: (RICKMAN, 1991)

1. Calentar el ciclo de combustión desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación.
2. Suministrar el combustible adicional para mantener la temperatura del ciclo de combustión durante la incineración.

3. Mantener la temperatura del ciclo mientras opera a vacío.

3.2.2 Ventajas y desventajas del sistema

Dentro de las ventajas que ofrece el sistema de cámara de combustión de lecho circulante para incineración de residuos peligrosos se encuentran: (RICKMAN, 1991)

1. Es aplicable para la disposición de combustibles peligrosos sólidos y líquidos.

2. No requiere partes móviles en la zona de combustión.

3. Los diseños son compactos convenientes para alcanzar altas velocidades de calentamiento por unidad de volumen (100,000 a 200,000 Btu/h ft³), resultan ser unidades pequeñas que requieren un bajo costo de inversión.

4. Las temperaturas relativamente bajas del gas y los requerimientos de exceso de aire tienden a minimizar la formación de óxido de nitrógeno con lo cual disminuye el costo de los sistemas de control de emisiones.

5. Los residuos líquidos y sólidos se pueden tratar por separado o en combinación.

6. Se adapta a una gran variedad de mecanismos de alimentación de residuos.

7. La alta turbulencia y exposición al aire de los residuos sólidos son características de este sistema.

8. La remoción de cenizas se realiza en forma continua sin interferir con la combustión.

9. Puede adaptarse para utilizar una amplia variedad de sistemas de control de contaminantes atmosféricos.

10. La superficie activa es grande debida a la acción fluidizante que mejora la eficiencia de combustión.

11. El sistema puede tolerar fácilmente las fluctuaciones en la velocidad de alimentación debido a las grandes cantidades de calor almacenadas en el lecho.

12. El secado de los materiales con alto contenido de humedad es rápido.

13. La adición de sustancias alcalinas al material del lecho suprime la formación de gas ácido, lo que reduce los requerimientos de control de emisiones.

Las desventajas que presentan estos sistemas son: (RICKMAN, 1991)

1. El lecho requiere preparación y mantenimiento.
2. Los materiales alimentados al lecho deben seleccionarse para evitar la degradación de este producida por la erosión y las reacciones químicas.
3. El costo de instalación es alto.
4. Las variaciones en la temperatura pueden provocar la aglomeración del lecho.
5. El filtro de bolsa puede presentar una alta carga de partículas.

8.3 INCINERADORES DE LECHO FLUIDIZADO

8.3.2 Descripción del sistema

Los incineradores de lecho fluidizado son unidades muy versátiles de destrucción térmica que se pueden utilizar para la disposición de una amplia variedad de residuos sólidos y líquidos. Los lechos fluidizados han sido utilizados industrialmente por más de 60 años. En un principio se usaron para la gasificación de la hulla, posteriormente se aplicaron en la desintegración térmica catalítica (cracking catalítico), calcinación metalúrgica, secado, enfriamiento y combustión de residuos.

No obstante, los incineradores de lecho fluidizado de burbujeo son relativamente nuevos. Comenzaron a aplicarse en 1960 principalmente en la industria del petróleo, en la industria del papel, en tratamiento de aguas residuales y para el procesamiento de residuos nucleares. Actualmente se utilizan para la combustión de carbón, madera, derivados de combustibles y de aguas residuales.

Un incinerador de lecho fluidizado de burbujeo consta básicamente de los mismos componentes que un sistema típico de incineración con excepción de las cámaras primaria y secundaria que se combinan en una sola.

Los componentes principales de estos sistemas son:

- Sistema de aire comprimido o caja de viento
- Placa de distribución de aire
- Lecho (generalmente de un material inerte)
- Área libre sobre el lecho para la oxidación de los gases volátiles.

El incinerador de lecho fluidizado de burbujeo consiste en un recipiente cilíndrico de acero al carbono recubierto con material refractario alineado verticalmente. Las dimensiones típicas de este tipo de incineradores varían de 10 a 50 ft de diámetro y de 30 a 50 ft de altura. El fondo del recipiente contiene un sistema de aire comprimido (o caja de aire), el cual recibe el aire fluidizado y el aire de combustión. El aire a presión es forzado a atravesar la placa metálica de distribución en la parte superior del sistema de aire comprimido. Las boquillas de la placa de distribución están diseñadas para permitir el paso de aire fluidizado al lecho e impedir que el material de este caiga dentro de la caja de viento.

El material inerte del lecho debe tener alto punto de fusión y baja reactividad con los residuos. Comúnmente se utiliza arena de sílice.

El flujo ascendente de aire a través del lecho produce un rápido y turbulento mezclado de los residuos con el material del lecho. Los residuos se inyectan cerca del fondo del lecho en uno o más puntos alrededor de la circunferencia del recipiente.

Debido al violento mezclado alcanzado en el lecho, los constituyentes peligrosos del residuo se destruyen a temperaturas mas bajas que las requeridas en otros sistemas de incineración. Las bajas temperaturas tiene como resultado un menor exceso de aire que el requerido por hornos rotatorios. Las temperaturas típicas requeridas en el lecho son de 750 a 870°C (1400 a 1600°F). Para controlar la temperatura puede inyectarse el combustible auxiliar o agua en el lecho. A estas temperaturas el contenido de calor es aproximadamente de 23.000 a 35.000 Btu/ft³, lo que provee al sistema de una gran reserva de calor. Por comparación, la capacidad calorífica de los gases combustibles a temperaturas similares es tres ordenes de magnitud menor que la de la arena fluidizada.

El precalentamiento del lecho anterior a la alimentación del residuo se lleva a cabo por medio de uno o mas quemadores auxiliares montados sobre el lecho. El calor se transfiere del lecho al material residual hasta que este alcance la temperatura de combustión. La agitación continua permite que una gran proporción de partículas permanezcan suspendidos hasta que ocurra la combustión completa del material.

Las cenizas salen a la superficie del lecho junto con los gases de combustión y se controlan por un sistema de control de contaminatos. Los principales factores que deben considerarse en el diseño y especificación de este tipo de incineradores son: la velocidad del gas, el diámetro del lecho, la temperatura del lecho y el tipo y composición del residuo incinerado.

El rango de velocidades del gas es de 5 a 7 ft/s. Velocidades mayores inducirian a la pérdida de partículas del lecho, lo cual incrementaria la carga en el sistema de control de contaminantes y disminuiria el tiempo de residencia del gas en el incinerador.

La profundidad del lecho fluidizado varia desde 15 pulg hasta algunos pies. La profundidad del lecho afecta al tiempo de residencia y a la caída de presión del sistema.

Después de la oxidación del residuo en el lecho, los gases de combustión, las cenizas y las partículas del lecho que fueron arrastradas ascienden a una zona libre del recipiente donde ocurre la oxidación de volátiles. El área libre de el lecho funciona como una cámara de combustión secundaria. La temperatura en esta zona se mantiene entre 980 y 1400°C (1800 y 2500°F) con la ayuda de quemadores auxiliares. El tiempo de residencia del gas típico es de 12 a 16 segundos y el tiempo de residencia de los sólidos varía dependiendo de las características del residuo.

Las velocidades de alimentación de líquidos varía de 50 a 300 gal/h dependiendo del contenido de humedad y el poder calorífico de los residuos. La incineración de sólidos en el sistema de lecho fluidizado por burbujeo está limitada por las características físicas del residuo. Los sólidos deben ser inyectados mecánica o neumáticamente lo que requiere homogeneidad en los residuos sólidos y un tamaño máximo de partícula de 2 in de diámetro. La existencia de grandes diferencias de gravedad específica entre los residuos puede ocasionar problemas durante la operación.

Los lodos con alto contenido de humedad se deben secar antes de inyectarse al lecho, ya que el exceso de humedad y las grandes cantidades de material inerte pueden reducir la temperatura del lecho, aumentando los requerimientos de combustible auxiliar para mantener la temperatura mínima de operación.

Los gases calientes de la porción libre del recipiente de combustión de lecho fluidizado, se pueden mandar al sistema de recuperación de calor o directamente al sistema de control de contaminantes atmosféricos. (RICKMAN, 1991)

8.3.2 Ventajas y desventajas del sistema

Dentro de las ventajas del sistema de incineración de lecho fluidizado se encuentran: (RICKMAN, 1991)

1. Es aplicable a combustibles peligrosos sólidos y líquidos.
2. No requiere partes móviles en la zona de combustión.
3. Los diseños son compactos convenientes para alcanzar altas velocidades de calentamiento por unidad de volumen (100.000 a 200.000 Btu/h ft³), resultan ser unidades pequeñas que requieren un bajo costo de inversión.
4. Los requerimientos de temperatura del gas y del aire en exceso son bajos, lo cual tiende a minimizar la formación de óxido de nitrógeno y disminuye el costo del sistema de control de emisiones.
5. Los residuos líquidos y sólidos se pueden tratar en combinación o por separado.
6. Los incineradores tienen una larga vida útil y un bajo costo de mantenimiento en comparación con otras unidades de la misma capacidad.
7. La superficie activa es grande debido a la acción fluidizante, lo que mejora la eficiencia de combustión.
8. El sistema puede tolerar fácilmente las fluctuaciones en la velocidad de alimentación y en la composición de los residuos debido a las grandes cantidades de calor almacenadas en el lecho.
9. El secado de los materiales con alto contenido de humedad es rápido.
10. La adición de sustancias alcalinas en el lecho suprime la formación de gas ácido, reduciendo los requerimientos en el control de emisiones.

Dentro de las desventajas de este tipo de sistemas se encuentran: (RICKMAN, 1991)

1. El sistema presenta dificultad para remover los materiales residuales del lecho.
2. El material del lecho requiere preparación y mantenimiento.
3. La alimentación al lecho debe seleccionarse para evitar la degradación de éste, producida por la erosión y reacciones químicas.
4. Puede requerir de procedimientos especiales de operación para evitar dañar el lecho.

5. Los costos de operación son elevados, principalmente los costos de energía eléctrica.

6. La formación de eutécticos puede causar grandes problemas.

3.4 INCINERADORES DE INYECCION LIQUIDA

3.4.1 Descripción del sistema

Los incineradores de inyección líquida destruyen fácilmente y a un bajo costo los líquidos de alto poder calorífico. Los incineradores diseñados para el manejo de sólidos resultan ser mucho más caros de construir y operar. Debido a que estos sistemas presentan limitaciones en tipo de residuo que pueden manejar, tienen menor aplicación en operaciones industriales y comerciales que requieren destruir una gran variedad de residuos.

Existen muchas variaciones de los incineradores de inyección líquida. Los dos principales tipos son:

1. Unidades de combustión verticales, las cuales constan de alimentación de residuos, quemadores de combustible auxiliar y sopladores de aire de combustión que se encuentran orientados verticalmente en el fondo de la cámara de combustión primaria.

2. Unidades de combustión horizontales, constan de alimentación de residuos, quemadores de combustible auxiliar y sopladores de aire de combustión localizados en uno de los extremos de la cámara de combustión primaria.

Los componentes de estos sistemas son los mismos que los de cualquier sistema típico de incineración de residuos peligrosos. La cámara de combustión primaria es un recipiente cilíndrico de acero al carbón enchaquetado con material refractario. Como su nombre lo indica está limitado a líquidos, lodos y suspensiones cuyas viscosidades sean menor de 10.000 SSU.

La razón de esta limitación es que los residuos se deben alimentar en forma de pequeñas gotas. Los líquidos con viscosidades mayores no se atomizan en gotas lo suficientemente pequeñas.

Minimizando el diámetro de la gota se maximiza el área superficial disponible para la transferencia de calor, lo que afecta al tiempo necesario para que el residuo alcance la temperatura de volatilización.

La combustión en líquidos consta de tres etapas:

1. Calentamiento hasta la temperatura de volatilización
2. Volatilización de los gases
3. Oxidación de los gases en una atmósfera de alta temperatura

La unidad de incineración debe estar diseñada para contener el residuo el tiempo necesario para que se lleven a cabo las tres etapas. El tiempo de residencia requerido para la volatilización del líquido es función del diámetro de la gota. El diámetro ideal de la gota es de 40 μm . para lograr este tamaño se utilizan cubetas rotatorias, atomización por presión o boquillas gas-fluido.

Los quemadores auxiliares y los sopladores de aire de combustión que se encuentran en la cámara de combustión primaria maximizan el mezclado del residuo con el aire de combustión, con lo cual, se minimiza el tiempo de volatilización.

La temperatura de la cámara de combustión primaria varía de 650°C a 980°C (1200°F a 1800°F) dependiendo del tamaño de la unidad, el calor liberado y de los requerimientos de exceso de aire. Un buen mezclado y una buena atomización de residuos orgánicos pueden disminuir la temperatura de combustión de algunos líquidos orgánicos a un rango de 650°C a 980°C (1200°F a 1500°F).

La velocidad de alimentación depende de las dimensiones de la unidad. Los gases calientes que abandonan la cámara de combustión pueden dirigirse al sistema de recuperación de energía o directamente al sistema de control de contaminantes. El precalentamiento de los residuos líquidos adecuado para optimizar las características de la alimentación puede realizarse con un simple intercambio gas-aire o gas-fluido orgánico. (RICKMAN, 1991)

8.4.2 Ventajas y desventajas del sistema

Las ventajas que presenta son: (RICKMAN, 1991)

1. Una amplia variedad de residuos líquidos se pueden incinerar.
2. El sistema no requiere de una de remoción de cenizas continua además del sistema de control de contaminantes.
3. La respuesta en la temperatura es rápida para cambios en la velocidad de alimentación del residuo combustible.
4. No tiene partes móviles.
5. El costo de mantenimiento es bajo.

Los incineradores de inyección líquida tienen las siguientes desventajas: (RICKMAN, 1991)

1. Únicamente los residuos que puedan ser atomizados se pueden incinerar.
2. El contenido de calor del residuo quemado debe mantener la temperatura de ignición o de incineración. de otra forma, debe suministrarse combustible adicional.
3. Los quemadores pueden ser obturados por sólidos.

El poco flujo de aire en la cámara de combustión primaria reduce la turbulencia, lo que disminuye la concentración de partículas en los gases de salida. El calor liberado de diseño es de aproximadamente 23,000 Btu/ft³ h. La capacidad de alimentación es desde 100 a 2000 lb/h, dependiendo de la capacidad calorífica y de las características físicas del residuo.

Los gases volátiles de la cámara primaria entran en la cámara de combustión secundaria. Los quemadores de combustible auxiliar y los sopladores de aire de combustión suministran calor suplementario y el exceso de aire (típicamente de 150 a 200% del requerimiento estequiométrico para los gases de salida) para mantener la temperatura en un ámbito de 1100° a 1400°C (2000 a 2500°F).

Los sopladores de aire de combustión están montados tangencialmente para proporcionar un mezclado turbulento de los gases de salida de la primera cámara con el aire de combustión. El tiempo de residencia en la segunda cámara es típicamente de 2 segundos a una temperatura de operación de 1200° (2200°F).

Los gases calientes se pueden enviar al sistema de recuperación de energía o directamente al sistema de control de contaminantes. Las emisiones de partículas en los sistemas de incineración de aire controlado son más bajas comparadas con las otras tecnologías (con excepción de los incineradores de inyección líquida). (RICKMAN, 1991)

8.5.2 Ventajas y desventajas del sistema

Las ventajas que presentan los incineradores de aire controlado son: (RICKMAN, 1991)

1. El sistema tiene potencial de recuperación de subproductos y/o recuperación de energía.

2. La reducción del volumen del residuo se lleva a cabo sin utilizar grandes cantidades de combustible suplementario.
3. La eficiencia térmica es mayor que la de los incineradores normales debido a las bajas cantidades de aire requerido.
4. La emisiones a la atmósfera se reducen.
5. El carbono de los sólidos se convierte en gas, el cual es más combustible.
6. Las emisiones de partículas a la atmósfera pueden eliminarse.
7. El costo de inversión es relativamente bajo.

Dentro de las desventajas de este tipo de sistemas se encuentran: (RICKMAN, 1991)

1. El quemado del material en la cenizas puede ser incompleto debido a un tiempo de retención insuficiente en la cámara primaria.
2. La operación continua puede causar problemas con las escorias o la reconstrucción del escalón y con el agotamiento del combustible, por lo que tiende a trabajar por etapas.
3. No puede aplicarse a residuos líquidos de baja capacidad calorífica y/o contaminados.
4. El control de los parámetros de operación se dificulta cuando existen grandes variaciones en la corriente de residuos.

2. La reducción del volumen del residuo se lleva a cabo sin utilizar grandes cantidades de combustible suplementario.

3. La eficiencia térmica es mayor que la de los incineradores normales debido a las bajas cantidades de aire requerido.

4. Las emisiones a la atmósfera se reducen.

5. El carbono de los sólidos se convierte en gas, el cual es más combustible.

6. Las emisiones de partículas a la atmósfera pueden eliminarse.

7. El costo de inversión es relativamente bajo.

Dentro de las desventajas de este tipo de sistemas se encuentran: (RICKMAN, 1991)

1. El quemado del material en la cenizas puede ser incompleto debido a un tiempo de retención insuficiente en la cámara primaria.

2. La operación continua puede causar problemas con las escorias o la reconstrucción del escalón y con el agotamiento del combustible, por lo que tiende a trabajar por etapas.

3. No puede aplicarse a residuos líquidos de baja capacidad calorífica y/o contaminados.

4. El control de los parámetros de operación se dificulta cuando existen grandes variaciones en la corriente de residuos.

IX. TECNOLOGIAS INNOVACION

No existe una definición oficial para distinguir entre las diferentes etapas del desarrollo de una tecnología alternativa de tratamiento. Sin embargo, por lo general se aceptan las siguientes definiciones funcionales: (EPA, 540/P-01/002)

Tecnología disponible (o existente).- Es aquella tecnología de tratamiento que se ha comprobado totalmente en usos comerciales y que cuenta con suficiente información disponible sobre su funcionamiento y costo, como son, la incineración en horno rotatorio y el proceso de solidificación/estabilización.

Tecnología de innovación.- En estas tecnologías, la información sobre su funcionamiento y costos es incompleta, lo que impide su uso rutinario en el tratamiento de residuos peligrosos. Una tecnología de innovación puede requerir pruebas en campo adicionales antes de considerarse aprobada para su comercialización.

Tecnología emergente.- Son las tecnologías que requieren pruebas de laboratorio o en planta piloto para demostrar la viabilidad técnica del proceso.

9.1 VITRIFICACION IN SITU

9.1.1 Descripción de la tecnología

En el proceso de vitrificación in situ (VIS), se utiliza energía eléctrica para calentar y fundir los residuos contaminados, formando una estructura cristalina estable. Se usan cuatro electrodos insertados en tierra para crear una corriente y calentar el residuo hasta una temperatura superior al punto de fusión típico de este (1600^o-2000^oC). (EPA, 540/P-01/002)

Debido a la baja conductividad eléctrica de la tierra, el cristal fundido se deposita entre los electrodos y como entre ellos fluye la corriente, el suelo adyacente se calienta hasta temperaturas mayores a la de fusión típica del suelo. Los contaminantes orgánicos dentro del compuesto fundido se volatilizan y se destruyen por pirólisis, los productos de esta alcanzan la superficie de la zona vitrificada, donde ocurre la combustión en presencia de oxígeno. Los contaminantes inorgánicos no volátiles se disuelven y se incorporan al compuesto fundido. El producto resultante no contiene residuos orgánicos. En la figura 9.1 se presenta un diagrama esquemático del proceso de vitrificación in situ. (EPA/540/P-91/002)

Un sombrerete a vacío en la chimenea recolecta los gases para su tratamiento antes de liberarse a la atmósfera. El sistema de tratamiento del gas se diseña de acuerdo a las condiciones de manejo y puede incluir un sistema de lavadores húmedos, intercambiadores de calor con sistema de enfriamiento, un calentador, un filtro y/o carbón activado. (EPA/540/P-91/002)

9.1.2 Descripción de la tecnología

Esta tecnología se utiliza para la destrucción, remoción o desactivación de todos los grupos de contaminantes, radioactivos, inorgánicos y orgánicos. Así como mezclas de residuos.

La vitrificación puede aplicarse al tratamiento de la mayoría de los tipos de suelo. Existen dos factores limitantes que son: el contenido de humedad (la humedad excesiva incrementa significativamente los costos) y la presencia de materiales que formen cristales (por ejemplo silicón y óxidos de aluminio). Si el suelo se encuentra demasiado húmedo puede secarse y si no existe suficiente cantidad de materiales que formen cristales puede agregarse un compuesto fundente. (EPA/540/P-91/002)

9.1.3 Ventajas y desventajas

Dentro de las ventajas que presenta esta tecnología se encuentran: (EPA/540/P-91-002).

1. La capacidad de destruir, remover o detoxificar todos los contaminantes.
2. La reducción del volumen de el residuo.
3. No se requiere de excavación, lo cual disminuye el costo del proyecto.

Las desventajas que limitan el uso de la tecnología son:
(EPA/540/P-91-002)

1. El gas de escape requiere de tratamiento con carbón activado, limpiadores húmedos y otros dispositivos de control de contaminantes.
2. El proyecto de vitrificación necesita incluir el lavado del material, ya que, los contaminantes pueden llegar a la periferia del compuesto fundido. Esto incrementa el costo.
3. Los elementos formadores de cristal deben tener la concentración adecuada para asegurar la estabilidad química del producto.
4. La VIS no es efectiva si la conductividad hidráulica es mayor a 10^{-4} .
5. La concentración del material orgánico en el residuo debe ser menor al 10% en peso para que pueda acoplarse al equipo existente de salida del gas.

9.1.4 Características del residuo que afecta al funcionamiento

1. La humedad del suelo debe tratarse antes de la vitrificación, lo cual afecta al costo.
2. El costo de la electricidad es un factor importante para determinar la viabilidad de la tecnología.

Las cenizas de la cámara primaria se enfrían por medio de un limpiador húmedo y se transportan a una tolva que las envía al área de manejo donde se analizan para determinar el contenido de contaminantes orgánicos.

Los gases volátiles de la cámara primaria fluyen a la cámara secundaria que utiliza temperaturas y tiempos de residencia mayores, turbulencia y energía auxiliar para destruir los gases. Los gases provenientes de la cámara secundaria pasan a través del sistema de control de emisiones, las partículas se remueven por un limpiador Venturi. El vapor ácido se neutraliza en una torre empacada. Un ventilador de tiro inducido envía al gas limpio desde el limpiador a la chimenea. Los efluentes líquidos del limpiador se envían a tratamiento. (EPA/540/5-91/008, NOV 1991)

9.2.2 Aplicabilidad de la tecnología

La tecnología de destrucción térmica por infrarojo es adecuada para suelos o sedimentos que contengan contaminantes orgánicos. Los residuos líquidos orgánicos - pueden mezclarse con arena antes de tratarse por este método. Las características óptimas que deben tener los residuos son: (EPA/540/5-91/008, NOV 1991)

1. Tamaño de partícula de 5 μm a 2 pulg.
2. Contenido de humedad mayor al 50% en peso.
3. Densidad de 30 a 130 lb/ft^3 .
4. Capacidad calorífica mayor a 10,000 Btu/lb
5. Contenido de cloro mayor al 5% en peso.
6. Contenido de azufre mayor al 5% en peso.
7. Contenido de fósforo de 0 a 300 ppm.
8. pH de 5 a 9
9. Contenido de metales alcalinos mayor al 1% en peso.

Las cenizas de la cámara primaria se enfrían por medio de un limpiador húmedo y se transportan a una tolva que las envía al área de manejo donde se analizan para determinar el contenido de contaminantes orgánicos.

Los gases volátiles de la cámara primaria fluyen a la cámara secundaria que utiliza temperaturas y tiempos de residencia mayores, turbulencia y energía auxiliar para destruir los gases. Los gases provenientes de la cámara secundaria pasan a través del sistema de control de emisiones, las partículas se remueven por un limpiador Venturi. El vapor ácido se neutraliza en una torre empacada. Un ventilador de tiro inducido envía al gas limpio desde el limpiador a la chimenea. Los efluentes líquidos del limpiador se envían a tratamiento. (EPA/510/5-91/008, Nov 1991)

9.2.2 Aplicabilidad de la tecnología

La tecnología de destrucción térmica por infrarrojo es adecuada para suelos o sedimentos que contengan contaminantes orgánicos. Los residuos líquidos orgánicos pueden mezclarse con arena antes de tratarse por este método. Las características óptimas que deben tener los residuos son: (EPA/510/5-91/008, Nov 1991)

1. Tamaño de partícula de 5 μm a 2 pulg.
2. Contenido de humedad mayor al 30% en peso.
3. Densidad de 30 a 130 lb/ft³.
4. Capacidad calorífica mayor a 10.000 Btu/lb
5. Contenido de cloro mayor al 5% en peso.
6. Contenido de azufre mayor al 5% en peso.
7. Contenido de fósforo de 0 a 300 ppm.
8. pH de 5 a 9
9. Contenido de metales alcalinos mayor al 1% en peso.

9.3 DESORCIÓN TÉRMICA

9.3.1 Descripción de la tecnología

La tecnología de desorción térmica consiste en una gran variedad de procesos para vaporizar componentes volátiles y semi-volátiles provenientes de lodos y suelos. El proceso está diseñado para permitir la combustión de los contaminantes en la unidad primaria, lo cual tiene algunas ventajas. Después de la desorción, los componentes orgánicos volatilizados se tratan en un postquemador o se condensan para su reuso o destrucción. La selección del tipo de equipo de control de contaminantes necesarios para el tratamiento de los gases de salida varía dependiendo de la naturaleza de los contaminantes y de la tecnología. El control de las partículas y polvo se lleva a cabo por medio de ciclones. Limpiadores venturi, las pequeñas cantidades de vapor ácido producidas requieren limpiado y los residuos orgánicos pueden condensarse y/o adsorberse en unidades de carbón activado.

Existen diferentes tipos de desorción térmica. A pesar de que no existe una definición general para cada uno de ellos, pueden describirse con los siguientes términos: (EPA/540/P-91/002)

Desorción con calentamiento directo

Desorción con calentamiento indirecto

Extracción de vapor in situ.

9.3.1.1 DESORCIÓN POR CALENTAMIENTO DIRECTO

Los sistemas de fuego directo utilizan como fuente de calor quemadores de combustible, que pueden ser internos o externos a la cámara de calentamiento primaria. Las unidades que cuentan con el sistema de calentamiento interno son semejantes a los hornos rotatorios, operan a temperaturas menores a 420°C (800°F) y generalmente su uso se limita al tratamiento de orgánicos no clorados, aunque pueden tratarse residuos clorados utilizando una unidad de desorción con carbón activado.

9.3.1.2 DESORCIÓN POR CALENTAMIENTO INDIRECTO

Los sistemas de calentamiento indirecto transfieren el calor al residuo a través de una superficie metálica. En el proceso se produce un volumen bajo de gas, por lo que, la carga que entra en el sistema de control de contaminantes es baja. Los contaminantes vaporizados se remueven de la unidad térmica utilizando gas con bajo contenido de oxígeno para prevenir la oxidación (combustión y explosión). Estos sistemas se caracterizan por sus condiciones de operación, una temperatura de aproximadamente 315°C (600°F) sirve como punto de rompimiento. Los sistemas que operan a temperaturas menores se utilizan para materiales volátiles y los que operan a mayores temperaturas se aplican al tratamiento de orgánicos semi volátiles y PCBs. Sin embargo, los materiales semi volátiles pueden removerse a bajas temperaturas de operación por el agotamiento producido por la presencia de vapor de agua y/o volátiles.

9.3.1.3 EXTRACCIÓN DE VAPOR IN SITU

En este proceso se inyectan vapor y aire caliente dentro de la tierra. Los orgánicos volátiles se separan del suelo y se recolectan en un anillo en la superficie. Esta tecnología se aplica especialmente en el caso de que el contaminante volátil se encuentre cerca de la superficie (donde la extracción al vacío es menos efectiva). A pesar de que generalmente no es aplicable a residuos semivolátiles, pueden realizarse algunas remociones.

El vapor se inyecta a 230°C (450°F) y el aire caliente a (150°C) por medio de sondas rotatorias a una profundidad de 30 ft.

9.3.2 Ventajas y desventajas del sistema

Esta tecnología presenta algunas ventajas como son:
(EPA/340/P-91/002)

1. La temperatura de operación es menor que la temperatura de incineración y se requiere menos combustible.

2. Las bajas temperaturas eliminan la volatilización de algunos compuestos metálicos.

3. Los productos de la combustión incompleta se eliminan al evitar la combustión en la unidad primaria de desorción.

4. La tecnología tiene la capacidad de separar y recuperar los contaminantes concentrados para un tratamiento posterior.

5. La tierra descontaminada conserva algunos compuestos orgánicos y algunas de sus propiedades originales.

La tecnología tiene algunas limitantes y requerimientos especiales de manejo como son: (EPA/540/P-91/002)

1. La tecnología no se aplica a contaminantes inorgánicos.

2. A pesar de que los desorbedores térmicos operan a temperaturas mucho más bajas que los incineradores, algunos metales (como mercurio y arsénico) pueden volatilizarse durante el proceso.

3. Se requiere de excavación para las unidades.

4. El contenido de humedad del suelo debe ser aceptable, por lo que puede necesitar deshidratarse.

5. El material debe pasarse por un tamiz para separar las partículas mayores.

6. El tamaño de partícula debe reducirse hasta el requerido por el equipo.

7. El pH debe encontrarse entre 5 y 11.

9.3.3 Características del residuo que afecta el funcionamiento

1. Los principales factores que afectan el funcionamiento del proceso son la temperatura y el tiempo de residencia.

2. Los residuos con alto contenido de humedad incrementan considerablemente el combustible.

3. El lodo y la arcilla producen mayor carga de polvo en el equipo de control de contaminantes, especialmente en los sistemas de calentamiento directo.

4. Otro factor importante es la volatilidad del residuo original. Un buen indicador de la volatilidad es el punto de ebullición del componente puro. Casi todos los residuos peligrosos son mezclas de varios constituyentes, por lo que, las características de la mezcla determinan la remoción real de un componente específico. (EPA, 540, 9-91, 002)

9.4 COMBUSTOR DE SAL FUNDIDA

9.4.1 Descripción de la tecnología

Este sistema se usa en la industria metalúrgica para recuperar metales, especialmente aluminio. Recientemente se ha comenzado a aplicar a la destrucción de residuos orgánicos.

En este método la destrucción del residuo se lleva a cabo en forma simultánea con la limpieza de los subproductos de combustión, previniendo las emisiones. Los residuos se inyectan junto con aire o aire enriquecido con oxígeno bajo la superficie de un lecho de carbonatos fundidos. La temperatura se mantiene en aproximadamente 900°C (1650°F) para favorecer la oxidación rápida del residuo. Las especies halogenadas forman sales, el fósforo, el azufre, el arsénico y el silice forman sales oxigenadas como fosfato de sodio, sulfato, arsenato y silicatos y se mantienen como sales fundidas en lugar de liberarse a la atmósfera como gases volátiles.

9.4.2 Ventajas y desventajas del sistema

La principal ventaja de este sistema es que el material fundido actúa como un limpiador al capturar los halógenos liberados durante la destrucción del residuo.

El sistema tiene, en general, las mismas desventajas que el incinerador de lecho fluidizado. Además, no puede aplicarse a residuos ácidos por que el contacto entre el agua y la sal fundida puede provocar una explosión. (RICKMAN, 1991)

9.5 REACTOR ELECTRICO

9.5.1 Descripción de la Tecnología

El reactor con pared fluida de alta temperatura requiere la generación de temperaturas superiores a 1600°C (2900°F). Es necesario evitar el contacto de la corriente de reacción con la pared del reactor, para esto se utiliza una cortina de gas inerte. El gas inerte fluye radialmente en el interior de un tubo poroso y también se usa como medio de transferencia de calor.

El reactor se calienta eléctricamente con resistencias de carbono. Debido a las temperaturas extremas alcanzadas en la operación, el aislamiento no consiste de ladrillo refractario sino de un campo de radiación hecho con múltiples capas de grafito respaldadas con carbón.

Durante la operación, el residuo se introduce en la parte superior de el reactor y cae a través de un espacio tubular al área donde se expone a la radiación con una densidad de potencia mayor a 1200 W/pulg^2 . Finalmente, los reactantes se calientan por radiación electromagnética. (RICKMAN, 1991)

9.5.2 Ventajas y desventajas del sistema

Dentro de las ventajas de esta tecnología se encuentran: (RICKMAN, 1991)

1. La alta densidad de energía radiante proporciona una temperatura de operación elevada que asegura la ruptura de los enlaces, por lo tanto, los residuos se transforman en sus constituyentes simples y se elimina la formación de productos intermedios. (RICKMAN, 1991)

2. La temperatura es lo suficientemente alta para destruir cualquier residuo y se produce gas limpio, lo que minimiza la necesidad de sistemas de limpieza.

3. El residuo sólido queda vitrificado.

4. La simplicidad del diseño reduce el costo de capital y de mantenimiento.

Las desventajas que presentan estos sistemas son: (CRICKMAN, 1991)

1. Los residuos sólidos deben pasar por una malla de talla 20 antes del proceso.

2. El reactor solo puede aceptar materiales sólidos.

9.6 ARCO DE PLASMA

9.6.1. Descripción de la tecnología

El plasma se refiere al cuarto estado de la materia cuando está no se puede definir como sólido, líquido o gas. El plasma se define como un flujo gaseoso conductivo cargado con partículas neutras, que tiene una carga total de aproximadamente cero.

El método más común para generar plasma es una descarga eléctrica a través de un gas. El gas a baja presión se utiliza como medio a través del cual, pasa una corriente eléctrica. La corriente eléctrica se convierte en energía térmica por la absorción de moléculas de gas. Las moléculas se activan, pierden electrones y forman un estado atómico ionizado. Las temperaturas del arco son superiores a $10,000^{\circ}\text{C}$ en el centro del reactor. Cuando las moléculas o los átomos pasan de un estado de alta actividad a un nivel de energía más bajo se emite radiación ultravioleta.

El arco de plasma aplicado a la destrucción de residuo puede entenderse como un dispositivo de conversión y transferencia de energía. La energía eléctrica que entra al equipo se transforma en un plasma con una temperatura superior a 10.000°C. Debido a que la actividad de los componentes del plasma disminuye, transfieren energía a los residuos expuestos al plasma. Los residuos se rompen en átomos, se ionizan, se pirolizan, y finalmente se destruyen. En este proceso el rompimiento del residuo ocurre casi instantáneamente y no se producen compuestos intermedios durante la recombinación cinética. (RICKMAN, 1991)

9.6.2 Ventajas y desventajas del sistema

Las ventajas del sistema son las siguientes:

1. Un sistema de plasma tiene una energía radiactiva muy intensa, por lo tanto, es capaz de transferir calor mucho más rápido que una flama convencional.
2. Los compuestos orgánicos clorados se deshidrogenan cuando se excitán con la radiación ultravioleta que se produce en el plasma térmico.
3. El arco de plasma es un proceso pirolítico por lo que no requiere de oxígeno. Comparado con los procesos de incineración convencionales que necesitan excesos de aire de aproximadamente 150% para asegurar la combustión, el sistema de plasma ahorra la energía requerida para caletar el exceso de aire y produce menos subproductos oxigenados.
4. El equipo es compacto y puede transportarse fácilmente de un lugar a otro.

Las principales desventajas que presentan los sistemas de arco de plasma son las siguientes:

1. El arco y el material refractario son un problema potencial debido a las altas temperaturas.
2. La operación del sistema requiere de personal altamente capacitado.

X. COSTOS

El método de estimación de costos que se presenta cubre diferentes diseños y accesorios incluyendo: tanques de almacenamiento de residuos, sistemas de carga de residuos, cámaras de combustión, equipos de recuperación de energía, sistemas de control de contaminantes y unidades de manejo de gas.

La actualización de costos se llevó a cabo considerando un índice de inflación promedio anual de 6% en Estados Unidos.

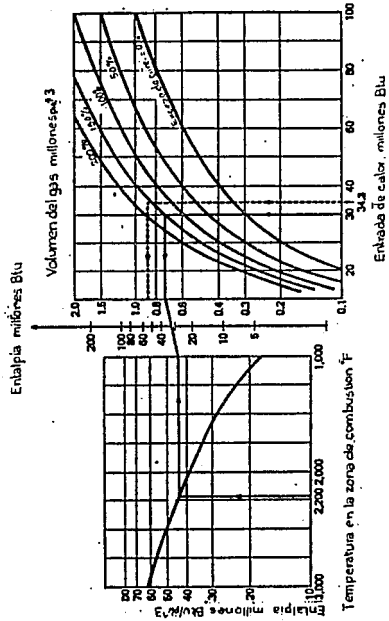
10.1 TAMAÑO DE LA CAMARA DE COMBUSTION PRIMARIA

Las cámaras de combustión se diseñan en base al volumen de gas de salida estimado por la combustión del residuo y del combustible auxiliar. El requerimiento de combustible auxiliar se determina por el balance de energía. El costo del equipo puede calcularse en base a los factores derivados de estas aproximaciones.

Las velocidades de flujo volumétrico del gas de salida y de los requerimientos de combustible auxiliar pueden estimarse utilizando las figuras 10.1 y 10.2. En la figura 10.1 se representa la entalpía total del gas. A una temperatura típica de la zona de combustión de 2200°F la entalpía es de $45 \text{ BTU}/\text{ft}^3$, si el calor de residuos que entran es de 30 millones de BTU/h y el exceso de oxígeno es de 150%, el volumen del gas a la salida es de aproximadamente $700,000 \text{ ft}^3/\text{h}$. El volumen del gas y la entalpía se conectan para obtener la entalpía del gas (aproximadamente 31 millones de BTU). En la figura 10.2 se ilustra la entalpía del vapor-agua como una función de la temperatura de la zona de combustión. (CHEMICAL ENGINEERING, SEPT. 1969)

Las entalpías del gas y del vapor-agua se agregan a las pérdidas de calor por radiación (estimadas en un 5% del calor de entrada) y se compara con el calor a la entrada.

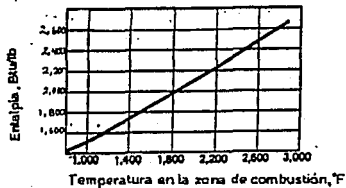
FIGURA 10.1
ESTIMADO DEL VOLUMEN Y ENTALPIA DEL GAS



Ref: Chemical Engineering 1983 Hazardous Waste Incineration

FIGURA 10.2.

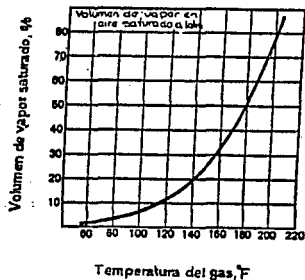
ENTALPIA DEL AGUA EN EL GAS DE SALIDA



Entalpia del vapor de agua = (entalpia de la gráfica)*
 (% de agua en el residuo)*(velocidad de alimentación)

FIGURA 10.3

CONTENIDO DE VAPOR SATURADO EN EL GAS



El calor perdido en las cenizas se considera despreciable. Si a la temperatura de operación la suma de calor perdido es mayor que el calor del desecho a la entrada es necesario agregar combustible auxiliar para compensar la diferencia. Alternativamente, el exceso de aire puede reducirse para disminuir la pérdida de calor. Si se agrega combustible auxiliar, el flujo de gas debe determinarse utilizando la entrada térmica total al incinerador (como indica la línea punteada en la figura 10.D).

Si la entrada de calor es mayor que las pérdidas puede incrementarse el exceso de aire para mantener la temperatura en la zona de combustión.

El volumen de la cámara de combustión primaria se determina considerando la entrada total de calor y la velocidad de liberación de calor deseada. Sin embargo, si se alimenta el residuo en un contenedor, la cámara de combustión debe ser lo suficientemente grande para manejar el calor liberado por la entrada durante un intervalo específico de tiempo.

Como regla general, un contenedor simple no debe exceder del 30% de la capacidad del incinerador para permitir un volumen suficiente en cámara de combustión para un incremento repentino en el flujo de gas provocado por una combustión rápida. Las velocidades típicas de carga son de 3 a 10 contenedor por hora. (CHEMICAL ENGINEERING, SEPT. 1963)

Los tamaños mínimos de la cámara de combustión primaria capaces de manipular varios tamaños de contenedores son:

<u>Tamaño del contenedor</u>	<u>Tamaño de la cámara</u> <u>10⁶ Btu/h</u>
2 ft ³	14
5 gal	5
30 gal	30
55 gal	55

Las cámaras de combustión de incineradores de residuos peligrosos se diseñan para velocidades de liberación de calor específicas. Para los tres mayores tipos de incineradores se muestran en la tabla 10.1.

Las velocidades bajas de liberación de calor se usan cuando el residuo tiene un alto contenido de cenizas (del 25 al 50%). Las velocidades altas se aplican a la incineración de residuos con bajos contenidos de cenizas.

10.2 TAMAÑO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN SECUNDARIA

La cámara de combustión secundaria se diseña con base en el tiempo de retención deseado. El flujo de gas que se genera por la combustión se multiplica por el tiempo de retención para dar el volumen de la cámara. El volumen del gas de combustión bajo condiciones normales (estimado en la figura 10.1) se corrige para las condiciones de la cámara de combustión (ft^3 reales) por medio de la ley del gas ideal. Debido a que la incineración se lleva a cabo a presión atmosférica, esta ley puede simplificarse quedando:

$$\text{ft}^3 \text{ reales} / \text{ft}^3 \text{ normales} = (\text{Temperatura de combustión} + 450) / 492$$

en el caso de que la temperatura estándar sea de 32°F , si fuera 70°F , el denominador sería 530. (CHEMICAL ENGINEERING, SEPT. 1993)

La altura de la chimenea depende principalmente de las especificaciones locales, la topografía y de los análisis de dispersión. Generalmente el diámetro se selecciona para mantener las velocidades del gas entre 10 y 30 ft/s . Los diámetros de chimenea normalmente son de 15 pulg a 9 ft y la altura es mayor a 200 ft (CHEMICAL ENGINEERING, SEPT. 1993)

TABLA 10.1

FLUJOS DE CALOR LIBERADO POR LOS PRINCIPALES TIPOS DE INCINERADOR

INCINERADOR	FLUJO DE CALOR LIBERADO (BTU/h FT ³)	
	BAJO	ALTO
Hogar	15,000	25,000
Horno rotatorio	25,000	40,000
Inyección líquida	25,000	60,000

Fuente: Chemical Engineering, Hazardous Waste Incineration,
Part 1, Sept. 1983

10.3 ESTIMACION DEL COSTO DE INVERSION

El costo de inversion de los tres principales tipos de incineradores de residuos peligrosos, pueden obtenerse por la Figura 10.4, en la que se encuentra el costo como una funcion de la entrada termica total. Estos costos incluyen las camaras de combustion, el equipo de control de contaminantes, equipo de recuperacion de energia y sistemas de almacenaje y carga de residuos.

Estos costos de inversion se estiman suponiendo que el lugar está preparado para la instalacion del equipo y que cuenta con los servicios necesarios. (CHEMICAL ENGINEERING, SEPT. 1993)

10.4 ESTIMACION DE COSTOS DE EQUIPO Y ACCESORIOS

10.4.1 Sistema de almacenamiento de residuos

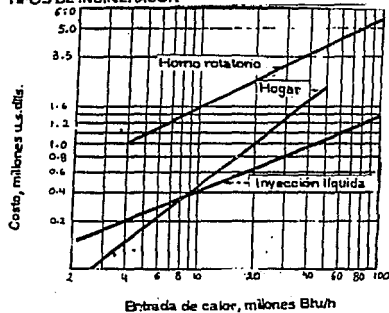
Las capacidades de los tanques de residuos liquidos, generalmente son menores a 10,000 gal en sistemas de incineracion y las velocidades son menores a 10 millones de Stu/h . En plantas grandes, las capacidades de los tanques individuales, rara vez son mayores a 25,000 gal y la capacidad de almacenaje total se determina por el numero de tanques. Los costos aproximados de los tanques se presentan en la tabla 10.2. (CHEMICAL ENGINEERING, OCT. 1993)

En los tanques de almacenamiento de residuos peligrosos es necesario instalar equipos de control de emisiones de compuestos organicos volatiles. Estas emisiones pueden controlarse por medio de tanques con condensadores. El costo tipico de un condensador con serpinos de cobre es de aproximadamente \$7,000 u.s.dlls y \$17,000 u.s.dlls para condensadores con tubos de acero inoxidable. Tambien pueden utilizarse unidades de carbon activado que tienen un costo aproximado de \$1000 u.s.dlls por unidad que tiene una vida util de seis meses a un año. (CHEMICAL ENGINEERING, OCT. 1993)

FIGURA 10.4

ESTIMADO GENERAL DE COSTOS PARA LOS TRES PRINCIPALES

TIPOS DE INCINERADOR



Ref.: Chemical Engineering, 1983. Hazardous Waste Incineration

10.4.2 Sistema de carga al incinerador

En incinerador con velocidades menores a 40 millones de Btu/h se utilizan, generalmente, carros de carga, los cuales tienen un costo aproximado de \$44,000 u.s.dls. Cada uno de estos carros puede contener 1,500 lb de residuo.

Los alimentadores de tornillos constan de transportador de tornillo de 5 ft, tolva y motor. El costo típico de estos sistemas para diferentes capacidades se muestra en la tabla 10.3

El costo de un cargador de pistones hidráulico puede obtenerse de la figura 10.5. Estos sistemas pueden usarse junto con un carro de carga o un alimentador de tornillos u operarse manualmente. Los residuos en pequeños contenedores como bolsas y tambores de 5 a 30 gal pueden cargarse por medio de un sistema de pistones. Los residuos en grandes contenedores, particularmente tambores de 55 gal requieren sistemas de carga equipados con esclusas de aire, venteo, aire de combustión interno y transportadores de tambor. El costo de estos sistemas varía de \$295,000 u.s.dls para incineradores con velocidades de 65 a 90 millones de Btu/h a \$500,000 para unidades con velocidades mayores a 90 millones de Btu/h. (CHEMICAL ENGINEERING, OCT. 1983)

10.4.3 Cámara de combustión

El costo de la cámara de combustión se determina por los costos del material refractario y de aislamiento, el material de la cámara y el sistema de quemadores.

El tipo y calidad del material refractario depende de las condiciones de operación del incinerador y especialmente de la temperatura en la zona de combustión y las características del residuo. El costo, las temperatura de operación y la aplicabilidad de los principales materiales se presentan en la tabla 10.4

10.4.2 Sistema de carga al incinerador

En incinerador con velocidades menores a 40 millones de Btu/h se utilizan generalmente carros de carga, los cuales tienen un costo aproximado de 314.000 u.s.dlls. Cada uno de estos carros puede contener 1.500 lb de residuo.

Los alimentadores de tornillos constan de transportador de tornillo de 3 ft. tolva y motor. El costo típico de estos sistemas para diferentes capacidades se muestra en la tabla 10.3

El costo de un cargador de pistones hidráulico puede obtenerse de la figura 10.3. Estos sistemas pueden usarse junto con un carro de carga o un alimentador de tornillos o operarse manualmente. Los residuos en pequeños contenedores como bolsas y tambores de 5 a 30 gal pueden cargarse por medio de un sistema de pistones. Los residuos en grandes contenedores, particularmente tambores de 55 gal requieren sistemas de carga equipados con esclusas de aire, venteo, aire de combustión interno y transportadores de tambor. El costo de estos sistemas varía de \$295.000 u.s.dlls para incineradores con velocidades de 65 a 90 millones de Btu/h a \$500.000 para unidades con velocidades mayores a 90 millones de Btu/h. (CHEMICAL ENGINEERING, Oct. 1963)

10.4.3 Cámara de combustión

El costo de la cámara de combustión se determina por los costos del material refractario y de aislamiento, el material de la cámara y el sistema de quemadores.

El tipo y calidad del material refractario depende de las condiciones de operación del incinerador y especialmente de la temperatura en la zona de combustión y las características del residuo. El costo, las temperatura de operación y la aplicabilidad de los principales materiales se presentan en la tabla 10.4

Las siguientes ecuaciones son útiles para estimar el área de la cámara de combustión a partir del volumen:

Para cámaras cilíndricas:

$$A = 5.76V^{0.67}$$

Para cámaras rectangulares

$$A = 0.30V + 1.19$$

Estas ecuaciones se basan en una correlación de las especificaciones de los fabricantes. (CHEMICAL ENGINEERING, OCT. 1963)

En algunos casos, no puede utilizarse el mismo tipo de material en todo el incinerador. La sección, el postquemador y los ductos del horno rotatorio pueden aislarse con ladrillos refractarios con 45% alumina y la sección trasera con ladrillos refractarios con 90% de alumina para resistir las altas temperaturas y la abrasión causada por la ceniza del horno. De la misma forma, el material del piso puede ser diferente al de las paredes y techo. (CHEMICAL ENGINEERING, OCT. 1963)

Alternativamente, los incineradores que operan a 2,400°F pueden aislarse totalmente con material de alumina al 90% para resistir la temperatura.

El espesor del material refractario depende de la temperatura de operación en la zona de combustión, la conductividad térmica del material y la temperatura deseada fuera de las paredes. (CHEMICAL ENGINEERING, OCT. 1963)

FIGURA 10.5

COSTO DE ALIMENTADORES HIDRAULICOS

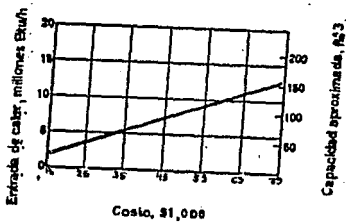


FIGURA 10.6

COSTO DEL SISTEMA DE QUEMADORES PARA RESIDUOS LIQUIDOS

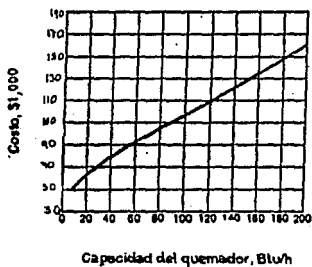


FIGURA 10.5

COSTO DE ALIMENTADORES HIDRAULICOS

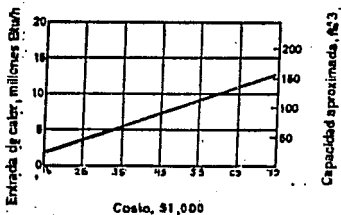
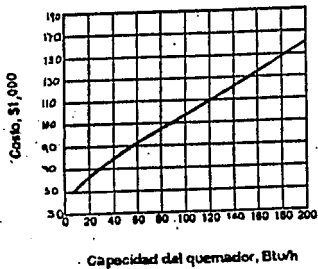


FIGURA 10.6

COSTO DEL SISTEMA DE QUEMADORES PARA RESIDUOS LIQUIDOS



10.4.4 Coraza de la cámara y sistema de quemadores

El costo de la coraza y del sistema de quemadores debe agregarse al costo del material refractario para obtener el costo de la cámara de combustión. El costo de la coraza de acero al carbón para incineradores de inyección líquida y de hogar es de aproximadamente \$130 u.s.dls/pie². La coraza de acero al carbón y mecanismo rotatorio para los incineradores de horno rotatorio puede estimarse en \$300 u.s.dls/pie².

Para resistir la corrosión, en algunos casos, las corazas del incinerador se fabrican de aleaciones o de níquel. Para obtener el costo de la coraza cuando se utiliza una aleación, se multiplica el costo del acero al carbón por los siguientes factores:

Acero inoxidable 316	2.7
Monel	3.3
Níquel	3.5

El número y capacidad de los quemadores de combustible auxiliar depende del poder calorífico y del contenido de humedad del residuo, de la temperatura de operación, el tiempo de precalentamiento y de la alimentación térmica al incinerador. Los quemadores de gas unitarios se usan en incineradores con velocidades de menos de 10 millones de Btu/h y están equipados con sopladores y sensores electrónicos de flama, su costo es de aproximadamente \$2,000 u.s.dls. (CHEMICAL ENGINEERING, OCT. 1963)

Frecuentemente se instalan más de dos quemadores en la cámara primaria si el valor calorífico del residuo es bajo o si el contenido de humedad es alto. Los quemadores de gran capacidad, de 1 a 5 millones de Btu/h cuestan alrededor de \$8,500 u.s.dls por quemador. Los sistemas de quemadores de 5 a 10 millones de Btu/h tienen un costo aproximado de \$13,500 u.s.dls cada uno.

FIGURA 10.7

COSTO DEL EQUIPO DE RECUPERACION DE ENERGIA

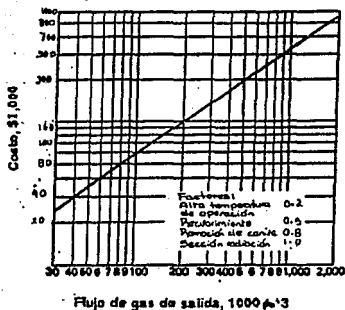
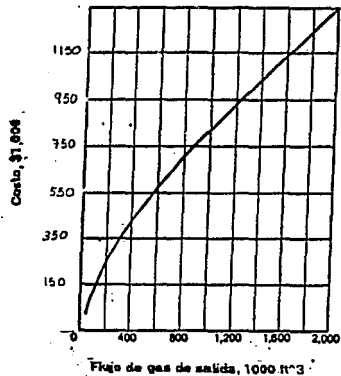


FIGURA 10.8

COSTO DEL EQUIPO DE CONTROL DE CONTAMINANTES



El costo de los sistemas de quemadores para residuos líquidos se encuentra graficado en la figura 10.6.

El costo de los sistemas de manejo de cenizas varía considerablemente dependiendo de la sofisticación del equipo. Los sistemas semiautomáticos se usan en incineradores de hogar con menos de 20 millones de Btu/h y su costo típico es de \$25,000 u.s.dls. Un sistema totalmente automático tiene un costo relativo a la capacidad del incinerador: (CHEMICAL ENGINEERING, OCT. 1983)

<u>Capacidad</u> <u>(millones Btu/h)</u>	<u>Costo</u> <u>\$u.s.dls</u>
10-30	100,000
30-70	200,000
>70	370,000

10.4.5 Equipos de recuperación de energía

El costo del equipo de recuperación de energía es una función del flujo volumétrico de gas como se muestra en la figura 10.6. Los hervidores de agua son de 50 a 100% más caros que las calderas humotubulares. Sin embargo, cuando el hervidor se integra con el equipo auxiliar, como retorno de condensado y sistemas de alimentación y tratamiento de agua, el costo puede compararse. En la figura 10.7 se representa el promedio de los equipos de hervidores de tubos de agua y humotubulares. (CHEMICAL ENGINEERING, NOV. 1983).

10.4.6 Equipos de control de contaminantes

El equipo de control de contaminantes presentado en la figura 10.8 incluye cámara de enfriamiento, limpiador venturi, absorbedor de torre empacada y eliminador de niebla. También está incluido equipo auxiliar y accesorios como son bombas, tuberías, válvulas, instrumentación y sistemas de control de pH.

FIGURA 10.9
COSTO DEL LIMPIADOR BAJO CONDICIONES SATURADAS Y 180°F

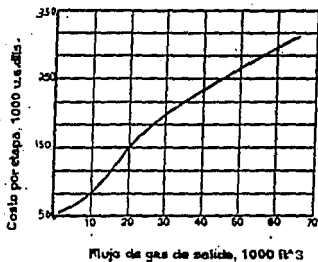
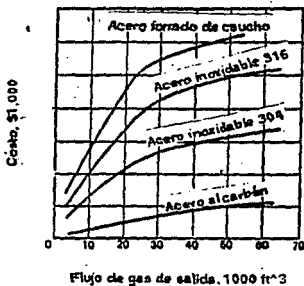


FIGURA 10.10
COSTO DEL SOPLADOR DE TIRO INDUCIDO
(@P=30 PULG DE AGUA, T=170°F)



Los limpiadores húmedos ionizantes pueden instalarse conjuntamente con otro equipo de control o usarse como dispositivo de control primario junto con la cámara de enfriamiento. El costo de los limpiadores húmedos ionizantes de una etapa se presentan en la figura 10.9. para estimar el costo de unidades de múltiples etapas puede multiplicarse el costo de uno simple por el número de etapas. (CHEMICAL ENGINEERING, NOV. 1963)

10.4.7 Sistema de manejo de gas

Los componentes de un sistema de manejo de gas son: ventilador de tiro inducido, cámaras de alta temperatura, ductos de baja temperatura y chimeneas. En la figura 10.10 se presenta el costo de ventiladores de tiro inducido para algunos materiales de construcción. El flujo volumétrico de gas se especifica a 170°F y 30 pulg de agua.

El precio del soplador se incrementa con la presión de operación. Como una aproximación, cada pulgada de presión afecta el costo del soplador en 1.5%. Se utilizan varios tipos de dispositivos para modular el flujo de gas a través del soplador. Los reguladores de mariposa de alta temperatura cuestan de \$25,000 a \$60,000 u.s.dls para flujos volumétricos de 6,000 a 50,000 pies³ reales/min. Los reguladores de tiro de guillotina cuestan \$17,000 u.s.dls cada uno. Los controladores de acero al carbono varían de \$1,700 a \$10,000 u.s.dls. (CHEMICAL ENGINEERING, NOV. 1963)

Las cámaras son lo más cortas posible, para vez son mayores a 30 ft. (CHEMICAL ENGINEERING, NOV. 1963)

10.5 AJUSTES AL ESTIMADO DE COSTO DE INVERSION

Después de estimar el costo del equipo debe ajustarse el costo de inversión. El costo de instalación puede estimarse en 50% del costo del equipo, suponiendo que todos los servicios están disponibles en el perímetro del lugar. El costo de instalación varía realmente del 30 al 100% del costo total del equipo dependiendo de los fabricantes.

El arranque del incinerador lleva de 2 a 4 semanas y puede estimarse en un 10% del costo del equipo. El costo de inventario es generalmente del 8% del total del equipo. El inventario incluye bombas, motores, termopares, empaques y material refractario.

El costo del proyecto es aproximadamente el 7% del costo total del equipo. En ausencia de información detallada, el costo de instrumentación y control se estima en 20% del total del equipo.
(CHEMICAL ENGINEERING, NOV. 1983)

10.6 ESTIMACION DEL COSTO DE OPERACION

10.6.1 Costo de mano de obra

El número de operadores requeridos en una planta de incineración depende del lugar donde se localiza. Si el incinerador se encuentra donde se genera el residuo peligroso estará integrado con las operaciones de manufactura.

10.6.2 Costos de servicios

La operación del equipo de control de contaminantes es el principal consumidor de agua. La cantidad que consume el sistema de manejo de cenizas es despreciable. La información sobre el consumo de agua se encuentra en la tabla 10.5. Este consumo puede reducirse por el reciclado de agua en el sistema. Aproximadamente el 75% del volumen inicial de agua está disponible para reciclarse.

TABLA 10.5

**REQUERIMIENTO DE AGUA PARA EL SISTEMA DE
CONTROL DE CONTAMINANTES**

EQUIPO	CONSUMO (gal/1000ft ³)
Cámara enfriadora	2.4 * 10.3T *
Limpiador Venturi	0.52 * P **
Absorberes de gas	
Torre empacada	15-35
Espreado	2-10
Platos	3-5

* Temperatura en F

** Presion en pulg. de agua

Fuente: Chemical Engineering, Hazardous Waste Incineration
Part 4, Ene 1984

TABLA 10.5

REQUERIMIENTO DE AGUA PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE CONTAMINANTES

EQUIPO	CONSUMO (gal/1000ft ³)
Cámara enfriadora	2.4 * 10.3T [†]
Limpiador Venturi	0.52 * P ^{**}
Absorbentes de gas:	
Torre empacada	15-35
Espreado	2-10
Platos	3-5

* Temperatura en F

** Presion en pulg. de agua

Fuente. Chemical Engineering, Hazardous Waste Incineration
Part 4, Ene 1984

10.6.4 Costo de mantenimiento

El costo de mantenimiento anual se calcula como un porcentaje del costo de inversión total del equipo. Para incineradores de inyección líquida se considera 5%, para tipo hogar 7% y para hornos rotatorios y sistemas complejos 10%. (CHEMICAL ENGINEERING, ENE, 1984)

10.6.5 Recuperación de energía

En la figura 10.11 puede obtenerse un estimado del valor del vapor recuperado por equipos instalados en incineradores. El valor del vapor se calcula a partir del costo equivalente de combustible-aceite para una caldera que opera al 80% de eficiencia para producir la misma cantidad de vapor. El valor anual se basa en 24 horas de operación durante 300 días/año y debe ajustarse para diferentes horas de operación y eficiencia de recuperación de energía. (CHEMICAL ENGINEERING, ENE, 1984)

10.7 EJEMPLO DE ESTIMACION DE COSTO DE UN INCINERADOR

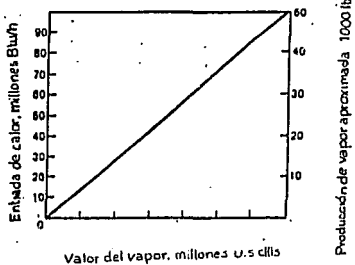
Para ilustrar la aplicación de este método, a continuación se estima el costo de un incinerador de horno rotatorio, el cual está equipado con un postquemador, una caldera para recuperación de energía, un limpiador venturi y un absorbedor de torre empacada. (CHEMICAL ENGINEERING, FEB, 1984)

Las características de operación son las siguientes:

Flujo de alimentación del residuo	5,000 lb/h
Temperatura del postquemador	2,200 °F
Exceso de aire	150%
Tiempo de residencia en el postquemador	2 s
Velocidad de liberación de calor (horno)	30,000 Btu/h pie ²
Combustible Auxiliar	Aceite combustible

FIGURA 10.11

VALOR DEL VAPOR RECUPERADO



Bases:

Costo de combustible: \$11 u.s. dts/millon Btu
 Eficiencia de recuperación de energía: 60%
 Presión de vapor: 100-250 psig
 Entalpía del vapor: 1194 Btu/lb

Calda de presión en el venturi	55 pulg agua
Valor calorífico del residuo	6,000 Btu/lb
Composición del residuo	21% agua
	6% cloro
	8% cenizas

10.7.1 Tamaño de las cámaras de combustión

Es necesario realizar una aproximación al balance de energía para poder estimar los requerimientos de combustible auxiliar:

Entrada de calor = Valor de calentamiento * alimentación
del residuo

Entrada de calor = $(6,000 \text{ Btu/lb})(5,000 \text{ lb/h}) = 30 \times 10^6 \text{ Btu/h}$

Salida de calor = Entalpia + Entalpia + pérdidas por
del gas vapor-agua radiación

Salida de calor = $(31 \times 10^6) + (2.3 \times 10^6) + (1.5 \times 10^6) = 34.8 \times 10^6$

fig. 10.1 fig. 10.2 5% entrada

Requerimiento de combustible = entrada - salida = $4.8 \times 10^6 \text{ Btu/h}$

Para una entrada térmica total de $34.8 \times 10^6 \text{ Btu/h}$, el flujo de gas seco resultante de la combustión es $880,000 \text{ pie}^3/\text{h}$ (figura 10.1). A 180°F el flujo es $1.14 \times 10^6 \text{ pie}^3$ reales/h. El vapor de agua contenido a 180°F es 50% (figura 10.3).

Por lo tanto, el flujo total de gas saturado a la salida del limpiador = $[(1.14 \times 10^6 \text{ pie}^3/\text{h}) \times 1.5] / 60 \text{ s/min} = 28,500 \text{ pie}^3/\text{min}$.

El volumen de la cámara de combustión primaria (horno rotatorio) considerando la entrada térmica total y la velocidad de liberación de calor será:

volumen horno = $[38.8 \times 10^6 \text{ Btu/h}] / [30,000 \text{ Btu/h pie}^3] = 1,160 \text{ pie}^3$

A este costo debe agregarse el costo de la coraza y del sistema de quemadores para obtener el costo total de la cámara de combustión. Suponiendo que las coraza sean de acero al carbon, el costo será el siguiente:

Horno rotatorio (cámara de combustión primaria):

$$651 \text{ pie}^2 * \$300/\text{pie}^2 = \$ 195,300 \text{ u.s.dlls}$$

Postquemador (cámara de combustión secundario):

$$1,147 \text{ pie}^2 * \$130/\text{pie}^2 = \$ 149,110$$

COSTO TOTAL CORAZAS = \$344,410 u.s.dlls

Cada una de las cámaras de combustión cuenta con un quemador de residuos y uno de combustible:

2 quemadores de residuos de 20 millones de Btu/h:

$$2 * (\$60,000) = \$120,000 \text{ u.s.dlls}$$

2 quemadores de combustible de 5 millones de Btu/h:

$$2 * (\$8,500) = \$17,000 \text{ u.s.dlls}$$

COSTO TOTAL DE QUEMADORES = \$127,000 u.s.dlls

10.8 CONSIDERACIONES FINALES

La estimación de el costo de un equipo de tratamiento térmico implicaría una investigación mucho más rigurosa sobre los precios actuales en México, debido a que no existe suficiente información con respecto a los costos de estos sistemas, todos los datos y gráficas presentadas en este capítulo se obtuvieron de una serie de artículos publicados en el Chemical Engineering, por lo que debe considerarse que pueden existir algunas diferencias con los costo reales en México principalmente por las variaciones en el precio de un equipo de un país a otro y las suposiciones realizadas en la actualización de estos.

A este costo debe agregarse el costo de la coraza y del sistema de quemadores para obtener el costo total de la cámara de combustión. Suponiendo que las corazas sean de acero al carbono, el costo será el siguiente:

Horno rotatorio (cámara de combustión primaria):

$$651 \text{ pie}^2 * \$300/\text{pie}^2 = \$ 195.300 \text{ u.s.dlls}$$

Postquemador (cámara de combustión secundaria):

$$1.147 \text{ pie}^2 * \$130/\text{pie}^2 = \$ 149.110$$

COSTO TOTAL CORAZAS = \$344.410 u.s.dlls

Cada una de las cámaras de combustión cuenta con un quemador de residuos y uno de combustible:

2 quemadores de residuos de 20 millones de Btu/h:

$$2 * (\$60.000) = \$120.000 \text{ u.s.dlls}$$

2 quemadores de combustible de 5 millones de Btu/h

$$2 * (\$8.500) = \$17.000 \text{ u.s.dlls}$$

COSTO TOTAL DE QUEMADORES = \$127.000 u.s.dlls

10.8 CONSIDERACIONES FINALES

La estimación de el costo de un equipo de tratamiento térmico implicaría una investigación mucho más rigurosa sobre los precios actuales en México, debido a que no existe suficiente información con respecto a los costos de estos sistemas, todos los datos y gráficas presentadas en este capítulo se obtuvieron de una serie de artículos publicados en el Chemical Engineering, por lo que debe considerarse que pueden existir algunas diferencias con los costos reales en México principalmente por las variaciones en el precio de un equipo de un país a otro y las suposiciones realizadas en la actualización de estos.

El principal objetivo de este capítulo es dar una idea aproximada del costo que implicaría la instalación, operación y mantenimiento de un sistema de tratamiento térmico. En este caso, toda la información está referida únicamente a equipos de incineración, que son los más utilizados comercialmente.

XI. EVALUACION DE LAS TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO TERMICO

La selección del tratamiento adecuado de los residuos peligrosos involucra la evaluación de todas las opciones disponibles. En este capítulo se presentan tablas comparativas entre los distintos tipos de tratamiento térmico, con el fin de poder seleccionar la mejor tecnología posible.

Los tratamientos térmicos generalmente resultan una opción apropiada para residuos peligrosos cuyo contenido de humedad sea bajo, es decir, con un porcentaje de sólidos mayor al 15%. es necesario también, que el poder calorífico de los residuos sea mayor a 1000 BTU/lb. Asimismo debe considerarse el contenido de sales inorgánicas y de sulfuros o halógenos, ya que de que se encuentren presentes pueden afectar el funcionamiento del horno o en el caso de sulfuros o halógenos debe compararse el costo que implicaría el proteger el equipo contra el ataque de los compuestos ácidos que pueden generarse contra el costo que produciría tratar el residuo por otro método.

En la tabla 11.1 se clasifican los residuos dependiendo de la facilidad con que pueden incinerarse, siendo esto uno de los principales factores que tiene que en cuenta para decidir si debe emplearse una tecnología de tratamiento térmico o alguna otra. En general, los materiales que se consideran buenos candidatos para incinerarse por tecnología apropiada son aquellos cuya composición sea carbono, oxígeno y/o hidrógeno ó carbono, hidrógeno y un porcentaje menor a 30% en peso de oxígeno y/o cloro.

Por otra parte, para los residuos inorgánicos y que contienen metales es conveniente evaluar el uso de algún otro proceso.

Los tratamientos térmicos, representan muchas más ventajas que desventajas (Tabla 11.2), no obstante, el mayor problema que tienen los procesos térmicos es el alto costo de inversión y de operación.

El costo de operación puede disminuirse aprovechando el calor del residuo y empleando algún sistema de recuperación de energía después de realizar un análisis económico y una evaluación de los riesgos técnicos involucrados. La generación de energía por la recuperación de calor del residuo debe considerarse como una posibilidad secundaria en el proceso térmico.

Los tratamientos térmicos son la opción más eficaz para reducir el peso, volumen o toxicidad de los residuos produciendo cenizas estériles y emisiones que pueden controlarse contando además, con la tecnología adecuada para la destrucción de la mayoría de los materiales peligrosos.

La selección de la tecnología apropiada depende de la composición del residuo, el estado físico en que se encuentra y las necesidades que se tenga, ya que pueden tener diferentes funciones como son la reducción del volumen, la separación de los residuos o la destoxificación de estos.

En la tabla 11.3 se muestran las diferentes tecnologías existentes, su función, el tipo y la forma de los residuos que manejan. El proceso que puede tratar casi todos los tipos de residuos es el agotamiento con vapor, sin embargo, esta tecnología solo lleva a cabo la separación de los materiales volátiles, por lo cual es conveniente en los casos en que se desea recuperar o purificar los materiales.

Los procesos que tiene capacidad para tratar tanto residuos en estado sólido, como líquido o gaseoso son incineración, pirólisis y oxidación catalítica, llevándose a cabo la destrucción del material peligroso, sin embargo, en el caso de pirólisis y oxidación catalítica su aplicación al tratamiento de materiales peligrosos es relativamente nueva. La incineración es una tecnología disponible que constituye una opción que se ha comprobado totalmente en usos comerciales y que es aplicable a una gran cantidad de residuos peligrosos.

Los procesos de destilación y evaporación son tecnologías apropiadas para el tratamiento de residuos líquidos, en donde se lleva a cabo la separación de los materiales peligrosos y la reducción del volumen de éstos. Los sistemas de plasma y sal fundida son tecnologías de innovación que no cuentan con información suficiente sobre su funcionamiento y costo para utilizarse en forma rutinaria. Estos sistemas tienen como función la reducción del volumen del residuo y la destrucción del material peligrosos y son aplicables a desechos sólidos y líquidos.

Dentro de las tecnologías disponibles que se evalúan en este capítulo se encuentran el horno de cemento, horno rotatorio, incinerador de cámaras múltiples, de lecho fluidizado y de inyección líquida.

El primer aspecto que se analiza es el tipo de residuo manejado por cada uno de estos sistemas. Cada diseño de un incinerador tiene como limitante el tipo de residuo que puede tratar, en la tabla 11.4 se resume la aplicabilidad de los diferentes sistemas a varios tipos de residuos. Como se puede observar tanto el horno rotatorio como el incinerador de cámaras múltiples pueden tratar todos los tipos de residuos, ya sea en estado sólido, líquido o gaseoso. El incinerador de inyección líquida está limitado a tratar residuo únicamente en estado líquido o gaseoso. En la tabla 11.5 se muestran la capacidad, temperatura de operación y el tiempo de residencia típicos para los principales equipos de incineración.

En el tratamiento de residuos peligrosos es posible utilizar una amplia variedad de tecnologías pero ninguna de ellas representa la solución a todos los problemas. Para encontrar la mejor opción en cada caso, es necesario evaluar las ventajas y desventajas de cada una. En la tabla 11.6 se presenta un cuadro comparativo entre las tecnologías disponibles.

El horno rotatorio es un equipo muy versátil ya que se puede adaptar a una gran variedad de mecanismos de alimentación y sistemas de control de contaminantes y tiene como características especiales que los residuos pueden alimentarse sin precalentarse o mezclarse. El tiempo de residencia se controla ajustando la velocidad rotacional del horno proporcionando una alta turbulencia y exposición de los residuo al aire. Este equipo puede operarse a temperaturas superiores a 2500 °F.

El lecho circulante es el sistema que al parecer cuenta con más ventajas ya que puede tolerar fluctuaciones en la alimentación, el diseño es compacto y puede reducirse el costo de control de contaminantes con la adición de sustancias alcalinas y con la temperatura baja del gas y el exceso de gas. La superficie activa mejora la eficiencia de combustión. El sistema de lecho fluidizado tiene muchas de las ventajas del sistema de lecho circulante pero es menos adaptable a los sistemas de alimentación y control de contaminantes, el grado de turbulencia no es tan alto y no cuenta con remoción continuas de cenizas, pero el costo de mantenimiento es más bajo.

De igual forma el costo de mantenimiento de los equipos de inyección líquida es bajo, proporciona una respuesta rápida cuando existen variaciones en la temperatura y no requiere de remoción continua de cenizas pero presentan grandes limitaciones en cuanto al tipo de residuos que pueden tratar, ya que únicamente, puede manejar residuos que puedan atomizarse.

Las principales ventajas de los incineradores de aire controlado son el potencial de recuperación de subproductos y/o energía, la eficiencia térmica es mayor que la de los incineradores normales y la emisiones son más bajas, teniendo un costo de inversión relativamente bajo.

Por último, en la tabla 11.7 se presenta un resumen de las fuerzas y debilidades en el cálculo de los parámetros en tratamientos térmicos. El primer parámetro que se evalúa es el calor de combustión, para el cual existen datos de calor liberado y temperatura alcanzada o pueden calcularse fácilmente pero existen inconsistencias en las clasificaciones. Con respecto a la temperatura de autoignición existen gran cantidad de información y correlaciones con datos descomposición térmica, sin embargo, algunos compuestos no presentan autoignición. Una de la ventajas en el cálculo de la cinética química es que puede considerarse que la destrucción determina la velocidad del proceso. La descomposición térmica es basa en un sistema experimental simple y se puede obtener 99.99% de eficiencia aunque las reacciones en la flama no se consideren.

El cálculo de los parámetros muchas veces no se dispone de toda la información necesaria pero pueden llevarse a cabo simplificaciones válidas.

La evaluación que se presenta en este capítulo no involucra tablas de costo - beneficios, que serían necesarias para hacer una evaluación más detallada, ya que no existe suficiente información de costos para llevarlas a cabo. Actualmente se están realizando estudios en este aspectos pero no se han concluido.

Los aspectos que se evalúan son principalmente técnicos, siendo el objetivo proporcionar un panorama general de los diferentes sistemas de tratamiento y los parámetros necesarios para su diseño, operación y control, y que esta información puede servir como base para estudios más profundos relacionados con cualquiera de los temas.

TABLE 11.1
 CLASIFICACION DE LOS RESIDUOS COMO CANDIDATOS A SER INCINERADOS
 POR LA TECNOLOGIA ADECUADA

CONTENIDO DEL RESIDUO	CATEGORIA DE INCINERACION
Carbono, oxigeno y/o hidrogeno	Buena
Carbono, hidrogeno <20% en peso de oxigeno y/o cloro	Buena
Carbono, oxigeno y/o hidrogeno >20% en peso de cloro, fosforo, azufre, bromo, iodo e nitrogeno	Potencial
Porcentaje desconocido de cloro	Potencial
Compuestos inorgánicos	Pobres
Compuestos que contienen metales	Pobres

Fuente: Richman, 1991. Handbook of Incineration of Hazardous
 Waste

TABLA 11.2

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Reducción de peso y volumen	Los costos de inversión y de operación son altos
Puede realizarse en el lugar donde se genera el residuo	La operación del equipo requiere de personal especializado
Las emisiones a la atmósfera pueden controlarse	No todos los materiales pueden tratarse por este proceso
Reducción de la toxicidad de los contaminantes	Para algunos materiales es necesario suministrar combustible auxiliar para mantener la eficiencia
Las cenizas resultantes son estériles	
Existe la tecnología para la destrucción de la mayoría de los materiales peligrosos	
El equipo requiere de poca área	
La utilización de técnicas de recuperación de calor disminuye considerablemente el costo de operación	

Fuente: Brunner, 1984. Hazardous Waste Processing Technology

TABLA 11.3 TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO TERMICO

METODO	FUNCION (a)	TIPO DE RESIDUO (b)	FORMA DEL RESIDUO (c)
Incineración	VR Da	3,5,6,7,8	S,L,G
Calcinación	VR	1,2,4,5	L,S
Pirólisis	VR De	1,2,3,4,6	S,L,G
Destilación	VR Se	1,2,3,4,5	L
Evaporación	VR Se	1,2,5	L
Agotamiento o/vapor	Se	1,2,3,4,6,7,8	L
Oxidación catalítica	VR De	3,5,7,8	S,L,G
Oxidación con aire húmedo	VR De	3,4	L
Plasma	VR De	1,2,3,4	S,L
Sal fundida	VR De	1,2,3,4,5,6	S,L

Kokoszka, Environmental Management Handbook, 1999

Notas:

- (a) VR = Reducción de volumen
Se = Separación
Da = Desintoxicación
St = Almacenaje

- (b) 1 = Químicos inorgánicos sin metales pesados
2 = Químicos inorgánicos con metales pesados
3 = Químicos orgánicos sin metales pesados
4 = Químicos orgánicos con metales pesados
5 = Radioactivos
6 = Biológicos
7 = Flamables
8 = Explosivos
9 = Aceite/agua

- (c) L = Líquido
G = Gas
S = Sólido

TABLA 11.4
 APLICABILIDAD DE LOS SISTEMAS TERMICOS DEPENDIENDO DEL TIPO DE RESIDUO

TIPO DE RESIDUO	HORNO DE CEMENTO	HORNO ROTATORIO	CAMARAS MULTIPLES	LECHO FLUIDIZADO	INYECCION LIQUIDA
Sólido					
Granular homogéneo		X	X	X	
Materiales de bajo punto de fusión	X	X	X	X	
Orgánicos con cenizas fundibles		X	X		
Gases					
Vapores orgánicos		X	X		X
Líquidos					
Compuestos acuosos contaminados con orgánicos	X	X	X		X
Líquidos orgánicos	X	X	X	X	X
Sólido/líquido					
Orgánicos halogenados	X	X	X	X	X
Suspensiones	X	X	X	X	X

Fuente: World Bank Technical Paper, 1989

TABLA 11.5
 AMBITO DE OPERACION PARA LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE INGENIERACION

TIPO	CAPACIDAD KG/h	TEMPERATURA C	TIEMPO DE RESIDENCIA DEL GAS
Inyección líquida	5,500	600-1500	0.1-2 s
Lecho fijo	1,750	500-1000	0.5-2 s
Horno rotatorio	3,500	500-1600	0.5-2 s (gases)
Lecho fluidizado	65,000	500-1000	0.5-1 s (gases) min (sólidos)

Fuente: Oppen, E. T., 1987

Tabla 11.4
 APLICABILIDAD DE LOS SISTEMAS TERMICOS DEPENDIENDO DEL TIPO DE RESIDUO

TIPO DE RESIDUO	HORNO DE CEMENTO	HORNO ROTATORIO	CAMARAS MULTIPLES	LECHO FLUIDIZADO	INYECCION LIQUIDA
Sólido					
Granular homogéneo		X	X	X	
Materiales de bajo punto de fusión	X	X	X	X	
Orgánicos con cenizas fundibles		X	X		
Gases					
Vapores orgánicos		X	X		X
Líquidos					
Compuestos azufrados contaminados con orgánicos	X	X	X		X
Líquidos orgánicos	X	X	X	X	X
Sólido/líquido					
Orgánicos no volátiles	X	X	X	X	X
Suspensiones	X	X	X	X	X

Fuente: World Bank Technical Paper, 1993

Tabla 11.5
 AMBITO DE OPERACION PARA LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE INCINERACION

TIPO	CAPACIDAD KGR	TEMPERATURA C	TIEMPO DE RESIDENCIA DEL GAS
Inyección líquida	3.500	500-1500	0.1-2 s
Lecho fijo	1.750	500-1000	0.5-2 s
Horno rotatorio	3.500	500-1500	0.5-2 s (gases)
Lecho fluidizado	65.000	500-1000	0.5-1 s (gases) min (sólidos)

Fuente: Oppert E. T., 1997

Tabla 1.1.5
CUADRO COMPARATIVO ENTRE LAS DIFERENTES TECNOLOGIAS DISPONIBLES

VENTAJAS DE LOS EQUIPOS	HORNO ROTATORIO	LECHO CIRCULANTE	LECHO FLUIDIZADO	INYECCION LIQUIDA	AIRE CONTROLADO
*Adaptable a una gran variedad de mecanismos de alimentación	X	X			
*Los residuos se pueden tratar por separado o en combinación	X	X	X		
*Alta turbulencia y exposición de los residuos al aire	X	X			
*Remoción continua de cenizas	X	X			
*No requiere remoción continua de cenizas				X	
*No existen partes móviles dentro del horno	X	X	X	X	
*Adaptable a una gran variedad de sistemas de control de contaminantes	X	X			
*El tiempo de residencia se puede controlar ajustando la velocidad rotacional del horno	X				
*Los residuos se pueden alimentar sin necesidad de precalentarse o mezclarse	X				
*Se puede operar a temperaturas superiores a 2500 F	X				
*Puede tolerar fluctuaciones en la alimentación		X	X		
*Respuesta rápida de temperatura a las variaciones en la alimentación				X	
*Diseños compactos		X	X		
*La adición de sustancias alcalinas reduce a costo de los sistemas de control de contaminantes		X	X		
*Temperaturas bajas del gas y exceso de aire disminuye el costo del equipo de control de emisiones		X	X		
*Emisiones reducidas					X
*Superficie activa mejora la eficiencia de combustión		X	X		
*Bajo costo de inversión					X
*Bajo costo de mantenimiento			X	X	
*Potencial de recuperación de energía y subproductos					X
*Alta eficiencia de remoción debido a los requerimientos bajos de aire					X

Fuente: Rickman, 1991. Handbook of Incineration of Hazardous

TABLA 11.7
RESUMEN DE FUERZAS Y DEBILIDADES EN EL CALCULO
DE PARAMETROS EN TRATAMIENTOS TERMICOS

PARAMETRO	FUERZAS (+) Y DEBILIDADES (-)
Calor de combustión Cambio de entalpia de reactivos o productos	<ul style="list-style-type: none"> - Los datos están disponibles o pueden calcularse - Datos de calor liberado y de temperatura alcanzada - Inconsistencias en las clasificaciones
Temperatura de autoignición Temperatura a la cual los compuestos arden en forma espontanea en presencia de aire	<ul style="list-style-type: none"> - Correlaciones con datos de descomposición térmica - Gran cantidad de referencias disponibles - Algunos compuestos no presentan autoignición
Química química Mecanismo de reacción usado como medida de incineración	<ul style="list-style-type: none"> - Se considera la destrucción como velocidad de proceso - No se considera como proceso físico - Los datos cinéticos disponibles son limitados
Descomposición térmica Determinación de la eficiencia de destrucción	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema experimental simple - Se puede obtener 95-99% de eficiencia - No se consideran las regulaciones en la flama
Otros métodos	<ul style="list-style-type: none"> - Formación de calor - Energía libre de Gibbs - Potencial de oxidación - Descomposición térmica en un ambiente de flama

Fuente: Richman, 1991. Handbook of Incineration of Hazardous

XII. LITERATURA CONSULTADA

- Bernard L., 1990. Los desechos y su tratamiento. Fondo de Cultura Economica, México. pp 91-104
- Brunner C. R., 1991. Handbook of Incineration Systems, McGraw Hill, Nueva York. pp
- Brunner C. R., 1984. Incineration Systems, McGraw Hill, Nueva York. pp 33-96, 305-356
- Brunner C. R., 1985. Hazardous Air Emissions from Incineration. Chapman and Hall, Nueva York. pp 134-171
- Brunner C. R., 1987. Chemical Engineering, Today's hot option for Waste Disposal. Chemical Engineering, Oct. 12, pp 96-106
- Corey R. C., 1985. Principles and Practices of Incineration, Wiley Interscience, Nueva York. pp 9-53
- Choremisinoff N. P et al, 1989. Industrial and Hazardous Wastes Impoundment, Anna Arbor Science. Londres. pp 165-169
- Deffis C. A., 1989. Basura como solución, México
- U. S. Environmental Protection Agency, 1991. Innovative Treatment Technologies. Overview and Guide to Information, 540/9-91/002. pp 2.2-2.28
- U. S. Environmental Protection Agency, Nov 1991. The Superfund Innovative Technology Evaluation Program. Technology Profiles. Fourth Edition, 540/5-91/006. pp 33, 74-75, 84-85
- U. S. Environmental Protection Agency, Abr. 1992. Eighteenth Annual Risk Reduction Engineering Laboratory Research Symposium. Abstract Proceedings, 600/R-92/028. pp 90-91, 146-147

Freeman H. M. 1988 Incinerating Hazardous Wastes. Technomic Publishing Co., Pennsylvania. pp 3-10. 23-28

Griffin R. D., 1989. Principles of Hazardous Materials Management, Lewis Publishers, Michigan. pp 115-134

Kiang Y. H., 1982. Hazardous Waste Processing Technology. Londres

Kokozka, L. G. et al, 1989. Environmental Management Handbook, Marcel Dekker Inc. pp. 422-427

Lindgren G., 1983 Guide to managing Industrial Hazardous Waste, Lewis Publishers, Michigan. pp 3-22

Martin E. et al, 1987 Hazardous Waste Management Engineering. Lewis Publishers, Michigan. pp 113-127

Oppelt E. et al, 1986 Thermal Destruction of Hazardous Wastes, Madrid

Research Systems Development, 1982. Solid Waste Handling and disposal in multistory buildings and hospitals. Vol. II, Washington. pp 100-103

Rickman W., 1991 Handbook of Incineration of Hazardous Waste. GRS Press, San Diego. pp 213-292

Rimer A. et al., 1988 Incineration. Operation and Maintenance. Manual of Practice. Water Pollution Control Federation. Virginia. pp 119-160

Royal Commission on Environmental Pollution, 1985. Londres

Santoreli C., 1989 Standard handbook of Hazardous Wastes Treatment and Disposal. McGraw Hill, Nueva York. pp. 120-122

Suckman L. G. 1980 Thermal Destruction of Hazardous Wastes. Wiley Interscience. Nueva York.

Travis C. G., 1989. Hazardous Waste Incineration and Human Health. CRC Press. Florida. pp. 3-12

Vosilind A. P., 1981. Unit Operation in Resource Recovery Engineering; Prentice Hall, Nueva York. pp 294-340

Vogel G. A. y Martin E. G., 1983. Chemical Engineering, Sept. 28. Hazardous Waste Incineration Parte 1. pp 143-146

Vogel G. A. y Martin E. G., 1983. Chemical Engineering, Oct. 17. Hazardous Waste Incineration Parte 2. pp 75-78

Vogel G. A. y Martin E. G., 1983. Chemical Engineering, Nov. 28. Hazardous Waste Incineration Parte 3. pp 87-90

Vogel G. A. y Martin E. G., 1984. Chemical Engineering, Eno. 9. Hazardous Waste Incineration Parte 4. pp 97-100

Wentz C. A., 1989. Hazardous Waste Management, McGraw Hill, Nueva York. pp 145-228

Wilson C. D., 1981. Waste Management Planning' Evaluation Technologies, Oxford Univeersity Press. pp 16-18, 154-172

Word Bank Technical Paper 0253-7444, 1989 The safe disposal of Hazardous Wastes; No. 93. pp 653-665, 683-734

INDICE DE TABLAS

		Página
1.1	Residuos tóxicos	5
1.2	Tecnologías de tratamiento físico	15
1.3	Tecnologías de tratamiento químico	16
1.4	Tecnologías de tratamiento biológico	16
4.1	Mecanismos del proceso de oxidación con aire húmedo	66
5.1	Mal funcionamiento de equipos de incineración	70
6.1	Dispositivos de remoción de partículas	84
7.1	Recuperación de energía en residuos sólidos	93
7.2	Costo de inversión de un sistema típico de recuperación de calor	99
7.3	Generación de energía utilizando el calor del residuo	99
10.1	Flujo de calor liberado por los principales tipos de incineradores	138
10.2	Costo de tanques de almacenaje para residuos líquidos	111
10.3	Costos de sistemas de alimentación para diferentes capacidades térmicas	144
10.4	Costo de materiales refractarios	144
10.5	Requerimiento de agua para el sistema de control de contaminantes	153
11.1	Clasificación de los residuos como candidatos a ser incinerados por la tecnología apropiada	163
11.2	Ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos	166

INDICE DE TABLAS

		Página
1.1	Residuos tóxicos	5
1.2	Tecnologías de tratamiento físico	15
1.3	Tecnologías de tratamiento químico	16
1.4	Tecnologías de tratamiento biológico	16
1.1	Mecanismos del proceso de oxidación con aire húmedo	66
5.1	Mal funcionamiento de equipos de incineración	76
6.1	Dispositivos de remoción de partículas	84
7.1	Recuperación de energía en residuos sólidos	93
7.2	Costo de inversión de un sistema típico de recuperación de calor	99
7.3	Generación de energía utilizando el calor del residuo	99
10.1	Flujo de calor liberado por los principales tipos de incineradores	138
10.2	Costo de tanques de almacenaje para residuos líquidos	141
10.3	Costos de sistemas de alimentación para diferentes capacidades térmicas	144
10.4	Costo de materiales refractarios	144
10.5	Requerimiento de agua para el sistema de control de contaminantes	153
11.1	Clasificación de los residuos como candidatos a ser incinerados por la tecnología apropiada	165
11.2	Ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos	166

11.3	Tecnologías de tratamiento térmico	167
11.4	Aplicabilidad de los sistemas térmicos dependiendo del tipo de residuo	168
11.5	Ámbito de operación para los principales equipos de incineración	168
11.6	Cuadro comparativo entre las diferentes tecnologías disponibles	169
11.7	Resumen de fuerzas y debilidades en el cálculo de parámetros en tratamientos térmicos	170

INDICE DE FIGURAS

		Página
3.1	Incinerador abierto	24
3.2	Sistema de incineración de hidrocarburos clorados	25
3.3	Sistema de incineración de hidrocarburos clorados con calentamiento del residuo y recuperación de subproductos	26
3.4	Balace de energía	29
3.5	Sistema de alimentación de residuos sólidos	35
3.6	Introducción de lodos y suspensiones	36
3.7	Sistema de alimentación de residuos líquidos	37
4.1	Proceso básico de incineración catalítica	42
4.2	Procesos de incineración catalítica	44
4.3	Reactor de pirólisis	47
4.4	Proceso de destilación discontinua	52
4.5	Proceso de destilación continua	53
4.6	Proceso de destilación azeotrópica	54
4.7	Proceso de destilación extractiva	56
4.8	Sistema de destilación con vapor	58
4.9	Sistema de agotamiento con vapor	60
4.10	Evaporador de termocompresión	62
4.11	Sistema de evaporación múltiple con alimentación directa	63
4.12	Sistema de oxidación con aire húmedo	65
6.1	Componentes de un proceso de incineración y de lavado del gas	88
7.1	Producción de vapor	97
10.1	Estimado del volumen y entalpía del gas	134

10.2	Entalpia del agua en el gas de salida	135
10.3	Contenido de vapor saturado en el gas	135
10.4	Estimado general de costos para los tres principales tipos de incinerador	140
10.5	Costo de alimentadores hidraulicos	145
10.6	Costo del sistema de quemadores para residuos	145
10.7	Costo del equipo de recuperaci3n de energia	147
10.8	Costo del equipo de control de contaminantes	147
10.9	Costo del limpiador bajo condiciones saturadas a 100 °F	149
10.10	Costo del sopiador de tiro inducido	149