

24.75



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**DISEÑO Y EVALUACION DE INCINERADORES  
DE DESECHOS SOLIDOS**



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO**

**PRESENTA:**

**JOSE VALENTIN RODRIGUEZ GUTIERREZ**



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.

I N D I C E

<b>INTRODUCCION</b>	3
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>GENERALIDADES</b>	5
1.1 Incineración	5
1.2 Bases teóricas	8
1.2.1 Combustión de sólidos	8
1.2.2 Generación de contaminantes	13
1.3 Caracterización de desechos sólidos	19
1.4 Tipos de Incineradores de desechos sólidos	20
1.4.1 Incineradores municipales	22
1.4.2 Incineradores de desechos industriales	33
1.5 Equipos para el control de la contaminación	41
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE INCINERACION</b>	53
2.1 Propiedades de los desechos sólidos	53
2.2 Emisión de partículas sólidas	58
2.3 Temperatura de combustión	66
2.4 Tiempo de residencia	68
2.5 Turbulencia en la zona de combustión	69
<b>CAPITULO 3</b>	
<b>METODO RECOMENDADO PARA EL DISEÑO DE INCINERADORES MUNICIPALES</b>	71
3.1 Balance de materia y energía	71
3.2 Dimensionamiento de la cámara de combustión	80
3.3 Diseño del horno con parrillas móviles	86
3.4 Diseño del horno rotatorio	89
3.5 Criterios de diseño	90
3.5.1 Materiales de construcción	90
3.5.2 Configuración de la cámara de combustión	92
<b>CAPITULO 4</b>	
<b>RECUPERACION DE ENERGIA EN SISTEMAS DE INCINERACION</b>	95
4.1 Consideraciones generales	95
4.2 Generación de vapor	99
<b>CAPITULO 5</b>	
<b>EVALUACION DEL SISTEMA DE INCINERACION</b>	108
5.1 Introducción	108
5.2 Evaluación del incinerador	109
5.2.1 Consideraciones básicas de diseño	109
5.2.2 Consideraciones sobre las propiedades del desecho	111

5.2.3 Evaluación de la temperatura, aire en exceso, tiempo de residencia y mezclado dentro del incinerador	113
5.2.4 Evaluación de la capacidad del combustible auxiliar	119
5.2.5 Evaluación del sistema de control del proceso de combustión	120
5.2.6 Evaluación de los materiales de construcción	121
<b>CAPITULO 6</b>	
<b>INSTRUMENTACION Y CONTROL EN SISTEMAS DE INCINERACION</b>	<b>123</b>
6.1 Introducción	123
6.2 Controles básicos en la operación de incineradores	124
6.3 Controles e indicadores de condiciones de operación	132
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>140</b>
<b>APENDICE</b>	<b>142</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>148</b>

## I N T R O D U C C I O N

El propósito del presente trabajo de tesis es el de mostrar el alcance que tiene la ingeniería de incineración de desechos sólidos, en lo que se refiere a la metodología disponible para realizar el diseño y la evaluación de los equipos en que se lleva a cabo la destrucción por combustión de materiales residuales o de desecho. La metodología y ecuaciones propuestas van enfocadas principalmente a incineradores de alta capacidad que son requeridos principalmente para desechos municipales.

En los últimos 25 años, la incineración realizada en equipos diseñados especialmente para ello ha surgido como una de las mejores alternativas para la disposición final de desechos a comparación de otros métodos tales como el relleno subterráneo, la inyección en pozos profundos y el vaciado de desperdicios en el mar.

Debido a que los sistemas y fenómenos de combustión son complejos, no se han podido desarrollar métodos de diseño del tipo "receta de cocina", es por ello que a la ingeniería de incineración aún se la considera como una mezcla de arte y tecnología.

Debido a lo anteriormente expuesto es por lo que se decidió hacer este trabajo de tesis; para indicar los principales criterios utilizados en el diseño, así como las ecuaciones empíricas que se han desarrollado y a partir de las cuales se pueda llegar a un dimensionamiento aproximado de la cámara de combustión del incinerador.

En el capítulo I se presentan los conceptos fundamentales, las bases teóricas, funcionamiento y características generales de los incineradores de desechos sólidos. Además se señalan los tipos de incineradores así como los equipos auxiliares que se utilizan en los sistemas de incineración para el control de la contaminación ambiental.

En el capítulo II se mencionan y analizan las variables de operación más impor-

tantes que influyen en el proceso de incineración, tales como: la temperatura del horno, el tiempo de residencia del desecho, el grado de turbulencia dentro del horno, así como las propiedades fisicoquímicas del desecho.

En el capítulo III se muestran las ecuaciones utilizadas tanto para efectuar los balances de materia y energía así como las ecuaciones desarrolladas para relacionar las dimensiones principales del incinerador con la capacidad requerida de operación y las características fisicoquímicas de los desechos sólidos. Se presentan además los lineamientos básicos para diseñar la configuración de un incinerador de desechos sólidos del tipo de horno rotatorio y del tipo de parrillas móviles.

En el capítulo IV se describen brevemente las alternativas de recuperación de calor que se presentan en los equipos de incineración, así como algunos criterios prácticos para el diseño de dichos sistemas de recuperación. Además se dan las ecuaciones de balance de materia y energía que nos determinan la cantidad de vapor que se puede obtener en función de la capacidad del incinerador.

En el capítulo V se proporcionan los procedimientos y criterios utilizados en la evaluación de los incineradores, lo cual se hace para probar la consistencia del diseño del incinerador para cumplir con las condiciones de operación requeridas.

En el capítulo VI se señalan las técnicas de instrumentación para controlar las condiciones de operación más importantes de los sistemas de incineración. Se describen aproximadamente los controles usados tanto en la cámara de combustión así como en los ductos de gases y equipos anticontaminantes.

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

#### 1.1 INCINERACION

Por lo general, el término "Incineración" se refiere al proceso que utiliza la descomposición térmica vía oxidación para convertir un desecho en un material menos voluminoso, tóxico y nocivo. Para que sea factible la aplicación de la incineración como método de disposición final de desechos, éstos deben estar constituidos en su mayoría por sustancias combustibles ya que además esto posibilita la instalación de un sistema de recuperación de energía a partir del calor desprendido en el proceso. En la mayoría de los casos el desecho tiene un alto contenido de combustible para soportar la combustión, sin embargo existen algunos desechos que no cumplen con esta condición, por lo que se hace necesario el uso de un combustible auxiliar o de apoyo.

Los principales productos de la incineración desde el punto de vista del producto producido, son el dióxido de carbono, agua y cenizas, mientras que desde el punto de vista de la contaminación ambiental, son los compuestos con azufre, nitrógeno, halógenos y metales pesados tales como el mercurio, arsénico, plomo y cadmio. Si los productos de combustión gaseosos de la incineración contienen compuestos indeseables, dichos gases son sometidos a tratamientos secundarios tales como el post-quemado (en cámara de combustión secundaria), lavado, filtrado y separación electrostática, usados para eliminar polvos y sustancias que no deben ser emitidas por la chimenea de escape del incinerador. Los efluentes sólidos y líquidos de estos procesos secundarios también requieren de tratamientos previos para su disposición final.

La incineración es pues un proceso mediante el cual son eliminadas en su mayor parte las corrientes de desecho en plantas industriales, así como los resi-

dos sólidos generados en nuestra moderna civilización, cuenta además con los siguientes beneficios y ventajas potenciales:

- 1.- Reducción de volumen, especialmente de sólidos voluminosos con un alto contenido de combustible.
- 2.- Destrucción y detoxificación, especialmente de combustibles carcinógenos, material contaminado patológicamente, compuestos orgánicos tóxicos o materiales biológicamente activos que pueden afectar a los seres vivos (hombres, animales y vegetales).
- 3.- Disminuye los efectos contaminantes sobre el medio ambiente, especialmente de materiales orgánicos que pueden emerger y producir olores desagradables generados por otros métodos de disposición final de desechos tales como el relleno sanitario.
- 4.- Cumplimiento de las disposiciones regionales de contaminación, especialmente de generación de gases y humos conteniendo compuestos odoríferos, orgánicos fotoactivos, monóxido de carbono, polvo y partículas sólidas sujetos a las limitaciones legales de contaminación.
- 5.- Recuperación de energía, factible cuando se dispone de grandes cantidades de desecho combustible y se requieren sistemas de producción de vapor en instalaciones cercanas.

Estas ventajas han justificado el desarrollo de una gran variedad de sistemas de incineración que difieren en funcionamiento y complejidad para satisfacer las necesidades de procesamiento de basura en municipios, instituciones y compañías industriales.

A contraposición de las anteriores ventajas se pueden definir las siguientes desventajas:

- 1.- Costo. En todas las instancias, la incineración constituye una etapa de procesamiento de desechos costosa, tanto en la fase de inversión inicial así como durante la operación.



2.- Problemas de operación. La variación en la composición de los desechos y la severidad de las condiciones de operación del incinerador generan muchos problemas prácticos tales como: el manejo de los desechos, el alto requerimiento de mantenimiento, etc.

3.- Repercusiones secundarias en el medio ambiente. Las cenizas producidas y las aguas residuales de los tratamientos secundarios aplicados para purificar los gases de combustión, a menudo contienen severos contaminantes que requieren de un adecuado manejo para evitar problemas ambientales y de salud pública.

4.- Riesgo técnico. Debido a los cambios de características de los desechos (por cambio de estación en desechos municipales e industriales) y a que el análisis del proceso es difícil, existe el riesgo de que un equipo de incineración resulte obsoleto e invalida su garantía de funcionamiento por un cambio en las condiciones y características del desecho.

A pesar de estas desventajas, la incineración ha persistido como un importante concepto en el manejo de desechos. Por ejemplo, en los E.U. alrededor del 20% del desecho sólido municipal y algunas fracciones mas pequeñas de residuos comerciales e industriales fueron incineradas en 1970. [ 2 ]

Estas cifras han estado aumentando conforme el paso del tiempo apoyadas en la importancia actual de la recuperación de energía de los desechos, en vez del reciclado de basura y el relleno sanitario, lo cual contribuye a la expansión del papel de la incineración en el futuro.

En México, la incineración es aplicada en las industrias y en algunas instituciones con equipo sumamente primitivo, los cuales producen emisiones indeseables a la atmósfera. En el Instituto Mexicano del Petróleo donde se realizó el presente trabajo, se llevó a cabo un estudio sobre un incinerador de desechos municipales de diseño suizo, que se encuentra ubicado en San Juan de Aragón

y fue adquirido por el D.D.F. en 1980. Dicho estudio esta dirigido principalmente al ahorro de energía y flexibilidad de la planta enfocado básicamente para el manejo de desechos hospitalarios patológicos. Tanto los municipios como las grandes industrias deben enfocar el manejo de sus desechos hacia la incineración de los mismos, con la idea de adquirir equipos de fabricación nacional, con lo cual ayudarían a evitar la contaminación por residuos y efluentes contaminantes. En las industrias, el gasto erogado en la incineración se incluye como un renglón de costos y servicios de producción o se puede crear para la generación de vapor a partir de la instalación de equipos economizadores de energía en el sistema de incineración.

La incineración de desechos municipales, constituye principalmente una actividad del sector público, el cual debe enfrentar este gasto como parte de la infraestructura y necesidad de este servicio en los municipios que generan grandes cantidades de desecho y cuyo manejo y transportación resulta difícil y además contribuye al aumento de la contaminación ambiental.

## 1.2 BASES TEORICAS

### 1.2.1 COMBUSTION DE SOLIDOS

El principio básico de la incineración de desechos sólidos consiste en el fenómeno de combustión, el cual predomina sobre los demás procesos tales como el de manejo y transportación de desechos, disposición y tratamiento de cenizas residuales, lavado de gases de combustión, etc.

El proceso de combustión es bastante complicado, por lo que una descripción analítica del comportamiento del sistema de combustión requiera de las siguientes consideraciones:

1.- Tanto el equilibrio como la cinética de las reacciones químicas operan a condiciones no homogéneas, no isotérmicas y sin régimen permanente.

2.- La mecánica de fluidos se presenta en mezclas reaccionantes no isotérmicas, no homogéneas y con liberación de calor que involucra flujo laminar, de transición, turbulento, estacionario, recirculante y en remolinos contenidos en zonas geométricas complejas.

3.- La transferencia de calor se realiza por conducción, convección y radiación entre los volúmenes de gas, líquidos y sólidos con grandes flujos de liberación de calor tanto al exterior como a los equipos de recuperación de calor. [ 5 ]

Estas consideraciones se tienen que aproximar a la idealidad para facilitar el análisis y diseño del sistema de combustión.

Cuando la combustión se aplica a la incineración, su complejidad se incrementa por las impredecibles y frecuentes variaciones de la composición del desecho, provocando cambios en el flujo de liberación de calor y las características de combustión tales como la temperatura de ignición y los requerimientos de aire de combustión.

La combustión de residuos en fase sólida tanto como líquida es básicamente un proceso que involucra los siguientes pasos: transporte de masa y energía y reacción química. De la cinética relativa de estos pasos, dependen la velocidad total y el éxito del sistema de combustión. La combustión de sólidos se lleva a cabo principalmente por una gasificación de material seguida por la combustión o reacción química con  $O_2$  de los productos gaseosos.

El desarrollo de hornos para quemar sólidos se ha enfocado a tres modos de incineración característicos:

1.- Quemado en suspensión. Los sólidos finamente divididos son inyectados a una cámara caliente junto con una corriente de aire. La combustión se completa mientras las partículas están suspendidas en el flujo gaseoso. Muchos residuos

salen del sistema aún junto con la corriente de gases. (Lecho Fluidizado)

2.- Quemado en semisuspensión. Los sólidos, regular o gruesamente divididos se inyectan mecánica o neumáticamente al espacio de combustión. El secado y la combustión ocurren parcialmente mientras los sólidos están suspendidos en el aire y se completa cuando las partículas caen en la parrilla. El residuo incombustible puede ser retirado continuo o intermitentemente.

3.- Quemado en masa. Los sólidos no divididos o gruesamente divididos se mueven en el espacio de combustión por medios mecánicos ( p. ej. en parrillas móviles o alimentación manual ), con lo cual son arrastrados y agitados o pueden permanecer estacionarios en el espacio de combustión hasta que ésta se completa adecuadamente. Los residuos son descargados periódica o continuamente.

Así pues, en el presente trabajo de tesis se hablará de los criterios de diseño de los incineradores que utilizan la combustión en masa ya que es el que tiene mas aplicación para el procesamiento de desechos municipales. En la combustión en masa la mayor parte del material a incinerar está protegido del calentamiento radiante, por lo que las partículas combustibles que se encuentran dentro del lecho de basura deben esperar su llegada a la superficie de ignición antes de que puedan experimentar un rápido incremento en su temperatura. En este tipo de incineración las velocidades de calentamiento oscilan entre 300 a 1000 °C/minuto. [ 2 ]

La introducción del oxidante (  $O_2$  del aire ) en ciertas áreas del interior del incinerador genera complicaciones secundarias en el análisis de la combustión. En el caso en el que una masa de residuo sólido en ignición se sitúa sobre una parrilla a través de la cual fluye el aire de combustión, el ambiente gaseoso varía con la distancia desde el fondo de la parrilla hasta el exterior del desecho. En el caso ideal, los procesos que ocurren en las diferentes zonas del incinerador son las siguientes:

a) En la parrilla, el suministro de aire es mayor al necesario estequiométricamente, por lo que la materia volátil liberada se quema rápida y completamente

que liberar vapor de agua y dióxido de carbono. La liberación de calor por unidad de volumen es alta. Se puede llamar a ésta la Zona de Quemado.

b) En la región arriba de la parrilla el  $O_2$  libre se ha agotado, por lo que el  $CO_2$  y el  $H_2O$  actúan como agentes oxidantes para producir  $CO$  y  $H_2$  en reacciones homogéneas y heterogéneas. Esta es la Zona de Gasificación.

c) En la zona superior al lecho de basura no se encuentra potencial oxidante en los gases, con lo cual el efecto obtenido es el de la inmersión de residuo sólido en un flujo de gases calientes con lo cual predominan las reacciones de pirólisis. Esta es la Zona de Pirólisis.

En los casos prácticos y situaciones reales, el lecho de basura se encuentra partido o separado en ciertas zonas debido a la forma heterogénea de los desechos lo cual provoca efectos de canalizaciones y/o desviaciones del aire de combustión que se introduce por la parte superior de las parrillas hacia el lecho de basura. Además, las diferencias locales de flujo de aire bajo la parrilla debido a las obstrucciones y variaciones en la densidad de los desechos, provoca irregularidades en los patrones de flujo de los materiales volátiles. El resultado de estos factores es la producción de hollín y de un flujo de gases de escape heterogéneo que varía entre un alto contenido de aire o de combustible.

### Pirólisis

La pirólisis o descomposición térmica ocurre en la mayoría de los sistemas de combustión y consiste en una gasificación o descomposición de los desechos sólidos en ausencia de aire o de un suministro de aire limitado. La pirólisis es un proceso de destrucción o cracking efectuado por la aplicación de calor en ausencia del  $O_2$  del aire en el que se producen gases y residuos sólidos. Generalmente la reacción global de pirólisis es endotérmica. En la Figura 1.1 se muestra la secuencia de pasos que ocurren en el proceso de pirólisis de un material de tipo orgánico:

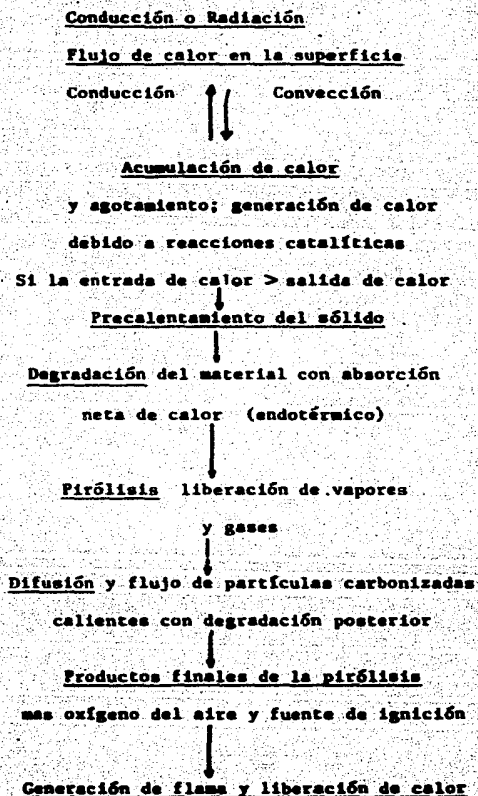


Fig. 1.1 Secuencia de los procesos involucrados en la pirólisis.

El paso lento en el proceso de pirólisis esta dado por la velocidad de transferencia de calor hacia el desecho y depende de la temperatura y las dimensiones físicas del desecho. Para piezas pequeñas de desecho utilizadas principalmente en condiciones experimentales, donde hay buen mezclado en el proceso, la rapidez con que se realiza la incineración está determinada por la temperatura a que se lleva a cabo la reacción de combustión de los materiales. [ 15 ] .

En la incineración de desechos municipales con piezas de residuos relativamente grandes, la transferencia de calor constituye el paso lento del proceso de incineración para el intervalo de temperaturas que se aplican prácticamente en la incineración.

[ 10 ]

#### 1.2.2 GENERACION DE CONTAMINANTES.

En la combustión tanto de combustibles como de corrientes de desecho, se generan contaminantes ambientales que tienen importancia para el ingeniero de diseño o analista del sistema de incineración en tres aspectos:

- 1.- Obtención de permisos de las agencias oficiales reguladoras para la instalación y operación del sistema.
- 2.- Establecimiento de las necesidades y/o especificaciones para los sistemas de control de contaminación ambiental.
- 3.- Establecimiento del diseño básico, sugerencias de modificación a diseños existentes o interpretación de problemas relacionados al control y minimización de emisiones contaminantes.

Los contaminantes emitidos de los procesos de combustión incluyen partículas sólidas inorgánicas, sólidos combustibles, líquidos y gases. [ materiales car-

bonizados, hollín, monóxido de carbono, hidrocarburos y otros compuestos especiales con carbono-hidrógeno-oxígeno-nitrógeno-halógeno, como algunos orgánicos solubles en benceno (BSO), materia orgánica policíclica (POM), hidrocarburos polihalogenados (PHH), bifenilos policlorados (PCB), bifenilos polibromados (PBB), benzo-pirenos (BaP), todos los cuales son peligrosos agentes contaminantes, algunos cancerígenos y en general perjudiciales a la salud del sistema ecológico], así como otros contaminantes químicos cuyo nivel de emisión está relacionado con la química del combustible auxiliar utilizado (óxidos de azufre, cloro, ácido clorhídrico, metales en trazas) y óxidos de nitrógeno cuya emisión depende de las interacciones entre el combustible y el sistema de incineración.

#### 1.2.2.1 PARTICULAS INORGANICAS.

Las partículas inorgánicas se diferencian del resto de las partículas emitidas en la combustión por su naturaleza o caracter refractario, es decir que ya no pueden ser reducidas por combustión, y su origen principal está en las cenizas o en combustibles contenidos en el desecho a ser incinerado. En principio, las partículas inorgánicas pueden surgir de la degradación mecánica del refractario ( paredes del horno ) u oxidación de las superficies metálicas expuestas a la flama, pero la mayor parte de las emisiones de partículas sólidas resulta de la presencia de materiales minerales introducidos con el combustible de desecho o a la carga de polvos que arrastra el aire de combustión que se alimenta.

La determinación de la materia inorgánica del combustible que aparece en la corriente de gases de escape es a menudo difícil debido a la complejidad de los procesos involucrados, por lo que se necesitan de métodos empíricos de estimación a menos que el diseño sea tal que esencialmente todos los sólidos introdu-



cidos salgan por la corriente de gases de escape. ( ver parte II.2 )

#### 1.2.2.2 COMBUSTIBLES SOLIDOS, LIQUIDOS Y GASES.

La combustión incompleta de combustibles de carbón puede resultar en una amplia variedad de especies químicas. El más simple, el carbón, contribuye importantemente en el opacamiento del efluente de la chimenea, debido a su color y tamaño de partícula que incrementa la dispersión de la luz.

Otra clase de contaminantes incluye los compuestos de carbono e hidrógeno ( metano, etano, acetileno ). Otro grupo de contaminantes involucran carbono, hidrógeno y oxígeno que forman desde monóxido de carbono y formaldehído hasta ácidos orgánicos complejos, ésteres, alcoholes, éteres, aldehídos, cetonas, etc.

Otro grupo de contaminantes incluye además nitrógeno que puede formar aminas, compuestos cíclicos nitrogenados, etc.

La importancia de estos contaminantes se asocia con casi todos los criterios de calidad del aire:

-- Algunos son partículas sólidas que contribuyen a la formación de bruma atmosférica y precipitación de sólidos con las lluvias.

-- Algunos son reactivos fotoquímicos que participan en la formación del humo visible comunmente llamado "smog".

-- Otros son sustancias tóxicas tanto para vegetales como para animales ( etileno, monóxido de carbono ) y otros son cancerígenos y causan problemas a la salud de personas y animales domésticos.

La presencia de material combustible en el efluente de un sistema de combustión refleja la ineficiencia de dicho proceso. Esto indica:

-- Tiempo de residencia insuficiente para completar las reacciones de combustión.

-- Nivel de temperatura insuficiente para favorecer la completación de la reacción de combustión.

-- Inadecuado mezclado del  $O_2$  con los gases combustibles para permitir una buena oxidación de los mismos. Esto se debe a la falta de turbulencia y una deficiente cantidad suministrada de aire de combustión.

### 1.2.2.3 CONTAMINANTES GASEOSOS RELACIONADOS CON LA QUIMICA DEL COMBUSTIBLE.

Un tercer grupo de contaminantes es liberado por reacción de ciertos elementos presentes en el combustible, entre los más comunes e importantes se encuentran los óxidos de azufre y el ácido clorhídrico.

#### Oxido de Azufre

Muchas corrientes de desecho y combustibles fósiles contienen azufre. El azufre puede estar presente en alguno de sus muchos estados de oxidación desde S-2 hasta S+6. De especial interés es el azufre que aparece como sulfuros orgánicos e inorgánicos, azufre libre o en forma de ácidos orgánicos e inorgánicos. Generalmente el azufre aparece en los gases de escape como dióxido de azufre o trióxido de azufre, donde solo el 2 a 4% del azufre aparece como trióxido. Los óxidos de azufre tienen importancia como contaminantes debido a sus efectos tanto a la salud de las personas como en la corrosión de materiales expuestos a ellos. Dentro del mismo sistema de combustión el  $SO_3$  puede reaccionar con vapor de agua para formar ácido sulfúrico, que tiene un punto de rocío considerablemente mayor al del agua pura. Para prevenir problemas serios de corrosión ( p.ej. en la chimenea ) por  $H_2SO_4$ , la sección fría del sistema de combustión limita su baja temperatura a un valor seguro por encima del punto de rocío del ácido sulfúrico.

### Acido Clorhídrico

El cloro aparece en corrientes de desecho tanto en sales inorgánicas como en compuestos orgánicos. En la combustión de muchos desechos industriales y mas importantemente en desechos sólidos municipales, una cantidad sustancial de materia orgánica clorada puede ser cargada en los hornos. Cuando en el medio de combustión el contenido de  $H_2$  se encuentra en exceso relativo al  $Cl_2$ , el cloro orgánico se convierte casi cuantitativamente en ácido clorhídrico. Es de gran importancia para el diseñador el hecho de que el HCl es altamente soluble en agua por lo que se puede crear ataque ácido y corrosión de cloruros en superficies metálicas.

#### I.2.2.4. OXIDOS DE NITROGENO

El óxido nítrico ( NO ) se produce a partir de sus elementos gracias a las altas temperaturas obtenidas en los hornos e incineradores. A bajas temperaturas la formación de NO se ve limitada por la cinética así como por el equilibrio que favorece la disociación de los elementos. Pequeñas porciones del NO se oxidan - posteriormente para formar  $NO_2$  dentro del horno y el restante NO se oxida después de salir de la chimenea a las temperaturas y concentración de oxígeno ambientales. El perjuicio que causan los óxidos de nitrógeno en el aire surge de la participación que tienen en las reacciones químicas atmosféricas, las cuales estimuladas por la luz ultravioleta solar producen una variedad de compuestos oxigenados que contribuyen a la reducción de la visibilidad y a las irritaciones oculares relacionadas con el "smog".

En sistemas de combustión, los óxidos de nitrógeno se producen por la interacción entre el  $N_2$  del aire de combustión con el  $O_2$  presente, llamándosele a eg

te proceso el de Generación Térmica. Pero también el NOx se puede formar de la oxidación del nitrógeno presente en los materiales combustibles, llamándosele a este proceso "Generación por Nitrógeno en el combustible, así pues, a altas temperaturas la fuente principal de NOx es la Generación Térmica y a bajas temperaturas es el proceso de Generación por Nitrógeno en el Combustible. La distribución de estos procesos de generación depende de las relaciones cinéticas y del equilibrio que controla a los procesos.

### Generación Térmica

La fijación del N<sub>2</sub> con el O<sub>2</sub> ocurre con el siguiente mecanismo de reacciones en cadena:



en donde M son moléculas de otros gases que catalizan la formación de los radicales. La reacción global viene a ser:



La velocidad de formación de NO es significativa solo a temperaturas mayores a 1800 °C por lo que las emisiones de NOx se ven favorecidas por altas temperaturas de flama, precalentamiento del aire de combustión y alimentación de grandes excesos de aire. El NOx se puede reducir inyectando vapor de agua o recirculando el gas de escape con lo que se reduce la temperatura de flama, o también operando a bajos excesos de aire con lo que se reduce la concentración de O<sub>2</sub>, o bien, retirando calor del sistema con equipos de recuperación de calor tales como hervidores de agua o precalentadores de aire de combustión.

### Generación por Nitrógeno en el Combustible

Este tipo de mecanismo contribuye de manera importante en la emisión de NOx, aunque aún no se conoce exactamente el proceso de generación de NOx, sin embargo, se ha observado que del 15 al 100% del N<sub>2</sub> contenido en el combustible se puede convertir en NOx cuando el contenido global de N<sub>2</sub> en el desecho es  $\leq 0.1$ . [ 5 ]

### 1.3 CARACTERIZACION DE DESECHOS SOLIDOS

Este subcapítulo pretende ir mas allá de la teoría básica de la combustión de desechos para introducirnos a los problemas, componentes y sistemas prácticos en incineración de desechos sólidos.

Para comenzar se debe descartar la idea de que los desechos sólidos son tan heterogéneos en su composición y propiedades que los problemas no se pueden definir y mucho menos resolver.

En realidad, las corrientes de desecho presentan gran variabilidad, por lo que el diseñador debe proveer a los equipos de una mayor flexibilidad de operación que los demás equipos de proceso convencionales. El conocimiento de una composición de desechos promedio y un rango probable de variaciones proporciona el punto de partida para la realización de un diseño.

Se ha demostrado que se cometen errores al tratar de estimar la capacidad de generación, composición y propiedades del desecho de alguna fuente, por lo que se recomienda un adecuado manejo y muestreo de desechos y la aplicación de métodos de prueba analíticos para determinar las características de los desechos a ser incinerados. Se deben hacer consideraciones cuidadosas para la estimación de los rangos de variación composicional de los desechos, tal como los municipales o industriales, los cuales se ven modificados por los cambios estacionales y climatológicos que determinan las fluctuaciones en el contenido de humedad, inertes y otras sustancias que pueden presentar los desechos. [ 2 ]

#### Composición de desechos sólidos

La composición preliminar de la basura se refiere a una categorización de los materiales de desecho (papel, vidrio, plástico, etc.). La composición así reportada constituye un rápido análisis visual que se pueda aplicar rápida y económicamente a grandes cantidades de desperdicios; esta información se pueda transformar posteriormente a una composición en términos químicos tomando un promedio de la composición química de las diferentes fracciones específicas de

los desechos. ( ver parte 2.1). La categorización de los materiales de desecho se puede utilizar para estimar el potencial de recuperación de las diferentes fracciones que componen la basura y desperdicios.

En algunas ocasiones las corrientes de desecho no pueden ser directamente muestreadas, por lo que datos proporcionados por otras municipalidades pueden utilizarse como indicadores de la composición media de los desechos municipales.

En el caso de los desechos industriales, estos son aún mas difíciles de muestrear y determinar sus propiedades para ser utilizadas en el diseño de incineradores, y esto se debe a la gran diversidad de industrias y la gran variedad de desechos que estas pueden producir, por lo que el diseño de los incineradores se debe hacer en base a un estudio especial de las características y capacidad de generación de desechos particulares de cada industria.

En la tabla 2.4 del capítulo 2.1, se encuentra la clasificación de desechos realizada por el Instituto de Incineradores de América, ( IIA ) de los E.U. en donde se determinan algunas propiedades fisicoquímicas para seis tipos diferentes de desechos.

En la siguiente sección se hace referencia a dichos tipos de desechos de acuerdo a las diferentes clases de incineradores que existen para el tratamiento de los mismos.

#### 1.4 TIPOS DE INCINERADORES DE DESECHOS SOLIDOS

La siguiente discusión pretende describir el panorama contemporáneo de la práctica de incineración de desechos municipales e industriales. En el mundo existen muchas rutas de incineración las cuales difieren entre sí principalmente por: 1) el tipo de cámara o sistema de combustión utilizado. 2) el sistema de alimentación y manejo de desechos dentro del incinerador. 3) el proceso de lavado

que se realiza sobre los gases de escape antes de que estos sean expulsados a la atmósfera. ( dispositivos de control de la contaminación, ver parte 1.5 ). A continuación se presenta la clasificación de incineradores hecha por el Instituto de Incineradores de América, IIA.

IIA : Clasificación de Incineradores por Clases

- Clase I:** Incineradores portátiles, de alimentación directa y con una capacidad de hasta 15 Kg/hr para desechos tipo 1 o tipo 2. ( \* )
- Clase IA:** Incineradores portátiles o instalados, de alimentación directa con una capacidad desde 10 hasta 50 Kg/hr para desechos del tipo 1 o tipo 2.
- Clase II:** Incineradores para departamentos habitacionales con ducto de alimentación, donde la entrada de desechos sirve como escape de los productos de la combustión, para desechos tipo 2.
- Clase IIA:** Incineradores para departamentos con ducto de alimentación, el cual es independiente del ducto de escape de los gases de combustión, adecuados para desechos del tipo 1 o tipo 2.
- Clase III:** Incineradores de alimentación directa, con una velocidad de combustión de 50 Kg/hr o más, apropiados para desechos tipo 0, tipo 1 o tipo 2.
- Clase IV:** Incineradores de alimentación directa, con una velocidad de combustión de 30 Kg/hr o más, apropiado para desechos del tipo 3.
- Clase V:** Incineradores Municipales, con una capacidad mayor a 1 tonelada/hr, disponible para desechos del tipo 0, 1, 2 ó 3 y combinaciones de estos.
- Clase VI:** Incineradores patológicos o crematorios apropiados para desechos del tipo 4.
- Clase VII:** Incineradores diseñados para ciertos subproductos industriales residuales específicos del tipo 5 o tipo 6. [ 20 ]

( \* ) Ver tabla 2.4 para la descripción de los tipos de desecho 0,1,2,...etc.

A continuación se presentan las principales características de los tipos más importantes de incineradores de desechos sólidos usados en el mundo:

#### 1.4.1 INCINERADORES MUNICIPALES

Un incinerador municipal es un incinerador que puede ser público o privado, diseñado y utilizado principalmente para quemar desechos sólidos comerciales y residenciales provenientes de una comunidad. El diseño de estos incineradores construidos hasta la fecha, difieren bastante entre sí debido al poco desarrollo de la tecnología de incineración, además del desconocimiento de varios parámetros básicos de diseño, los cuales son determinados por los criterios personales de cada diseñador.

Un incinerador municipal consiste básicamente de los siguientes componentes:

- a) Un depósito para el almacenamiento de desechos.
- b) Un sistema de grúas y palas para introducir los desechos al ducto de alimentación de la cámara de combustión.
- c) Un mecanismo de transporte de desechos a través de la cámara de combustión. (parrillas u horno rotatorio)
- d) Un quemador de combustible auxiliar para iniciar la ignición de los desechos y mantener el proceso de combustión.
- e) Sistema de transporte al exterior de residuos incombustibles y cenizas inertes.
- f) Sistema de ductos para transportar los gases de escape hacia los equipos de recuperación de calor y dispositivos de purificación de gases para el control de la contaminación.
- g) Sistemas de ventilación para introducir el aire de combustión en el interior



## I N C I N E R A D O R

## M U N I C I P A L

- 1.- Depósito de almacenamiento de desechos
- 2.- Sistema de palas de alimentación
- 3.- Ducto de alimentación
- 4.- Parrillas transportadoras de desecho
- 5.- Quemador de combustible auxiliar
- 6.- Ducto para cenizas residuales
- 7.- Sistema de ventilación para la introducción del aire de combustión
- 8.- Equipos de recuperación de calor y/o purificación de gases de escape
- 9.- Sistema de ventilación para la expulsión de los gases de escape y chimenea
- 10.- Tratamiento de cenizas incombustibles y relleno sanitario

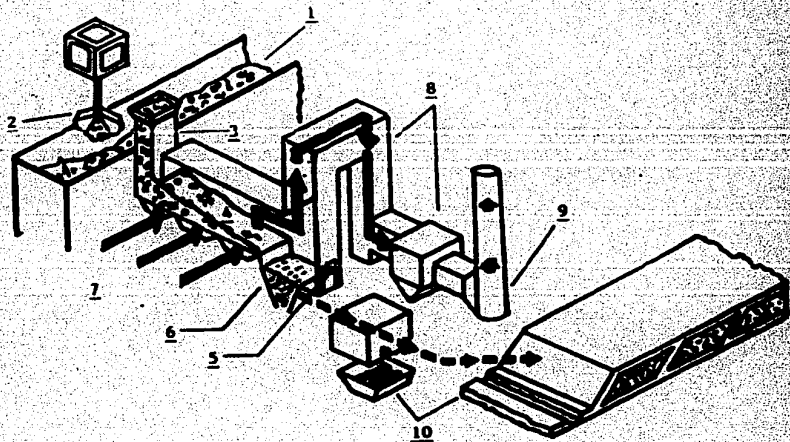


Fig. 1.2 Incinerador municipal con alimentación continua.

de la cámara, y para expulsar los gases de combustión purificados a través de la chimenea.

La operación de estos incineradores puede ser continua o intermitente dependiendo de la capacidad del sistema de alimentación y de las parrillas transportadoras de desecho en la cámara de combustión. (ver figura 1.2 ) [ 1, 2, 3 ]

### Parrillas y Hogares

Prácticamente todos los hornos de incineración emplean hogares refractarios para contener al desecho durante su incineración, o también, tipos especiales de parrillas para alimentar, transportar y mezclar el desecho durante el proceso de combustión dentro del horno.

La combustión se consigue mediante la ignición de los materiales, utilizando un quemador de combustible auxiliar y la inyección de aire de combustión dentro del sistema para proporcionar el  $O_2$  necesario para la reacción de oxidación. Aproximadamente, un 40 - 60% del aire total de combustión se suministra debajo de las parrillas y a través de ellas para enfriar las parrillas y para proporcionar cierta agitación promoviendo así la combustión en el lecho de basura. [ 8 ]

Existe un número de tipos diferentes de hogares y parrillas diseñadas para satisfacer las diversas necesidades que se presentan en los sistemas de incineración; a continuación se describen brevemente las mas importantes:

#### 1.- Hogar estacionario:

El hogar estacionario es básicamente un piso refractario en el horno sobre el cual se deposita el desecho para su incineración.

En ausencia de puertos de aire bajo el lecho de basura, el aire se introduce a lo largo de las paredes en la parte superior del horno y la combustión procede de una manera similar que en una fogata u hogera pero en mejores condiciones gracias a la retención de calor por radiación de las paredes y el techo del horno.

El hogar estacionario se aplica principalmente en pequeños incineradores comerciales e industriales, así como en crematorios e incineradores de desechos hospitalarios. Incluyen quemadores de gas para mantener la temperatura elevada dentro de la cámara de combustión. Ver figura 1.3

#### 2.- Parrillas estacionarias:

Los hornos de parrillas estacionarias son muy similares a los de hogar estacionario, con la diferencia en que el soporte del desecho que se incinera está constituido por barras o parrillas con aberturas y rendijas por donde se puede alimentar una cierta cantidad de aire de combustión y además permite la descarga de cenizas residuales a través de las aberturas. Estos sistemas de incineración requieren generalmente de alimentación manual colocando el desecho sobre barras o parrillas deslizables. Ver figura 1.4

#### 3.- Parrilla circular:

Este tipo de parrilla se utiliza en incineradores de operación intermitente; la parrilla se localiza en el fondo de una cámara de combustión cilíndrica y consiste básicamente de un cono rotatorio provisto con aspas giratorias usadas para la agitación de los desechos durante la combustión y para transportar las cenizas al depósito de residuos incombustibles. El aire de combustión se suministra a través de la parrilla y el centro del cono mediante una ventilación forzada. En estas parrillas el desecho se descarga sobre el cono y después se va desplazando lentamente hacia la periferia de la parrilla gracias a los brazos agitadores. Este tipo de incineración produce grandes emisiones de sólidos volátiles, por lo que no se ha favorecido su aplicación. Ver figura 1.5

#### 4.- Horno Rotatorio:

El sistema de incineración continua de desechos es uno de los métodos de disposición final de basura más utilizado y se aplica principalmente para inci-

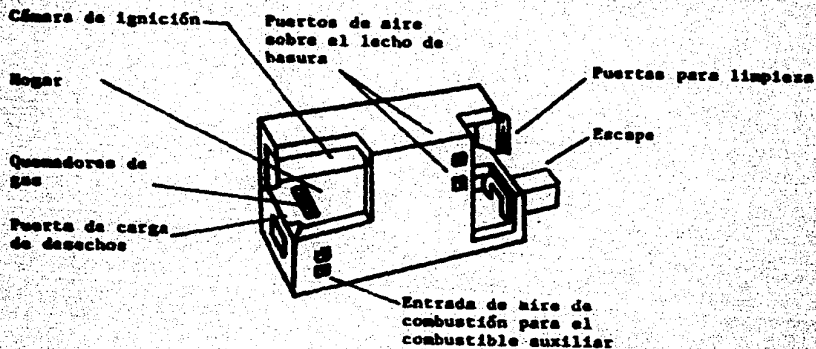


Fig. 1.3 Incinerador de hogar rotatorio

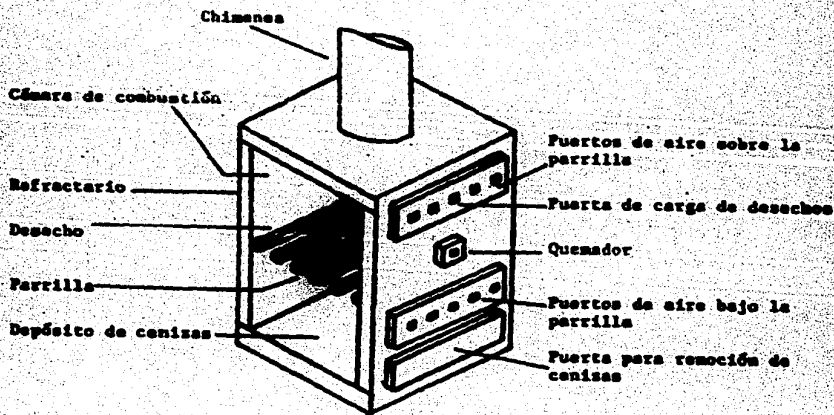


Fig. 1.4 Incinerador de parrillas estacionarias

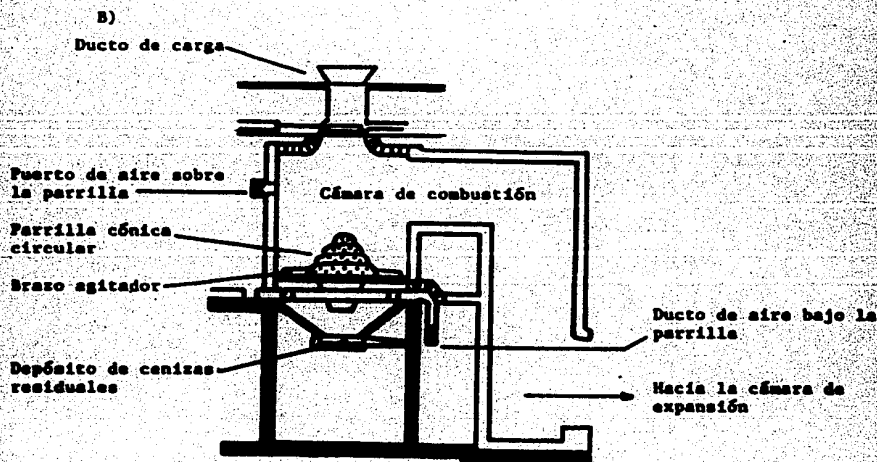
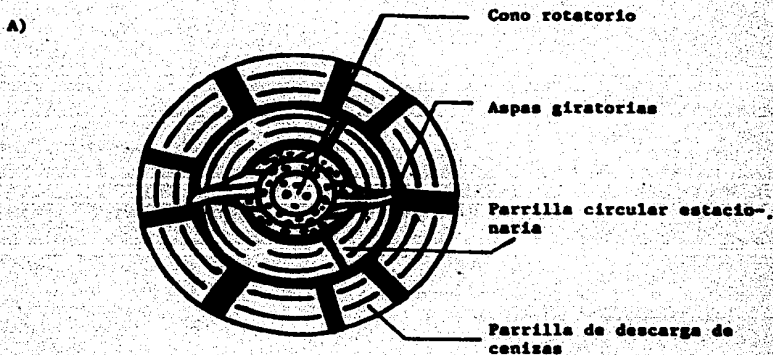


Fig. 1.3 a) Vista de planta de la parrilla circular  
b) Horno cilíndrico con parrilla circular

narar una gran variedad de residuos lodosos y desechos sólidos.

El principal componente del horno rotatorio es un cilindro semihorizontal metálico forrado de material refractario el cual gira entorno a su eje. El horno rota o gira continuamente exponiendo las superficies del material de desecho al calor y al oxígeno en la corriente de gases. El tiempo de residencia del desecho dentro del horno es función tanto de la velocidad de rotación así como de la inclinación que presenta sobre el plano horizontal y los elementos de retención que pueda haber en el interior del horno cilíndrico.

El quemador que inicia la ignición y proporciona una fuente suplementaria de calor se puede colocar en cualquiera de los extremos del horno. Las cenizas y residuos de combustión se decargan por el extremo inferior y hacia los transportadores de residuos. En ocasiones parte de los gases de combustión se reciclan al horno para ser usados en el secado parcial del desecho entrante y/o se pueden pasar a través de un hervidor para recuperar la energía producida en el proceso. Ver figura 1.6 [ 25 ]

### 5.- Parrillas mecánicas en operación continua:

Estas parrillas tienen una amplia aplicación en sistemas continuos de incineración principalmente de desechos municipales, ya que mantienen un flujo constante de desecho desde el ducto de alimentación, pasando por el área de combustión hasta el extremo de descarga de residuos de combustión. Por debajo de las parrillas se alimenta parte del aire de combustión que además proporciona un efecto de enfriamiento en las partes metálicas de las parrillas para protegerlas de la oxidación y el excesivo calentamiento.

#### a) Parrillas móviles de banda:

Consiste de un sistema de transportación metálico semejante a una banda transportadora. Consiste de una parrilla móvil inclinada para recibir al desecho en donde se crea un efecto parcial de secado, y a continuación otra parrilla en posición horizontal donde se realiza la combustión para después tirar a las

cenizas en un depósito u otro transportador. En la parte superior de la cámara de combustión en la que se encuentran las parrillas se localiza el ducto de salida de los gases de combustión. Ver figura 1.7

**b) Parrillas oscilantes:**

Es una parrilla con elementos metálicos que no tienen desplazamiento a lo largo del horno, sino que tienen un mecanismo mediante el cual los elementos metálicos oscilan verticalmente produciendo un transporte continuo del desecho a lo largo de la parrilla, la cual se encuentra ligeramente inclinada con el extremo inferior dirigido hacia la descarga de residuos de combustión. Este sistema proporciona un adecuado mezclado al desecho durante la combustión, además de distribuir la basura y las cenizas sobre la parrilla para evitar que halla zonas de la parrilla expuestas al fuego directo de los quemadores. Ver figura 1.8

**c) Parrillas reciprocantes:**

Esta parrilla consiste de elementos metálicos rectangulares que se desplazan alternadamente hacia adelante y hacia atrás para proporcionar el movimiento y agitación al desecho. El sistema de parrillas se encuentra inclinado hacia abajo en la dirección de la zona de descarga de los residuos de combustión. Existen otros sistemas similares que empujan la basura en sentido inverso a la zona de descarga con lo cual se genera una agitación mas efectiva ya que se crea un efecto de enrollamiento del desecho sobre la parrilla ya que el desecho tiende a bajar por gravedad gracias a la inclinación de las parrillas. Ver figura 1.9

**d) Parrillas rodantes:**

Las parrillas rodantes consisten básicamente de rodillos metálicos giratorios sobre los que se transporta el desecho. Este sistema fue desarrollado en Alemania para contrarrestar el alto costo de las múltiples parrillas de banda requeridas para obtener una mejor combustión. La rotación de los rodillos del

Ducto de alimentación

Puertos de aire sobre la parrilla

Parrilla de  
secado

Parrilla de  
ignición

gases de escape

Hacia los lava-  
dores de gas

Horno Rotatorio

Ventilador de tiro  
forzado

Quemador

Depósito de  
cenizas

Figura 1.6 Incinerador de Horno Rotatorio



Sección de secado

Sección de combustión

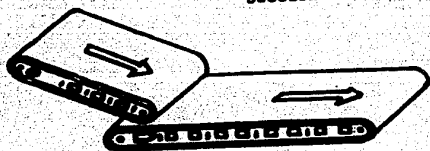
Dirección del  
flujo de desechos

Fig. 1.7 Parrillas móviles de banda

Posición elevada

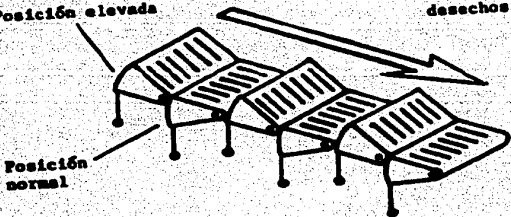
Posición  
normalDirección del flujo de  
desechos

Fig. 1.8 Parrillas oscilantes

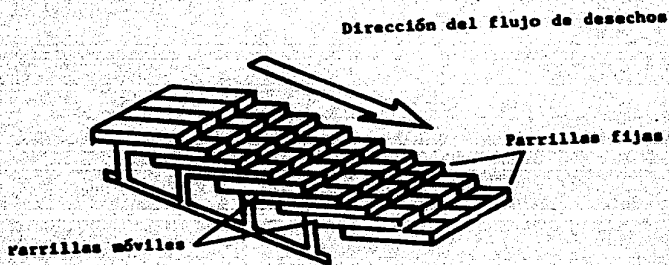


Fig. 1.9 Parrillas reciprocantes

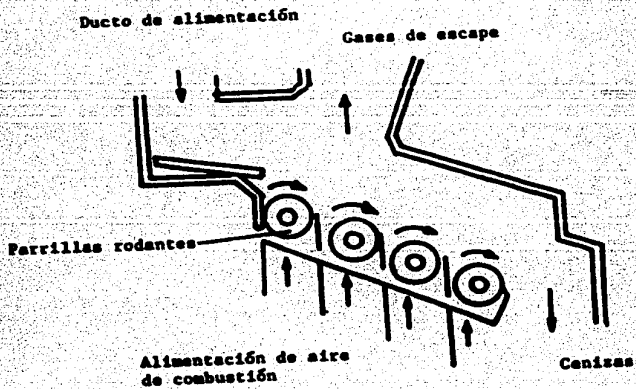


Fig. 1.10 Parrillas rodantes

emparrillado generan una fuerte acción de mezclado sobre los desechos, además de transportarlos hacia los sucesivos rodillos del sistema en donde se lleva a cabo el secado, ignición, combustión y cernido de las cenizas incombustibles a través de las parrillas para su depósito en los transportadores de residuos.

Ver figura 1.10 [ 35 ]

#### 1.4.2 INCINERADORES DE DESECHOS INDUSTRIALES

Los incineradores de lodos y ciertos desechos sólidos comerciales e industriales difieren sustancialmente de aquellos utilizados para desechos municipales, dependiendo del tipo de residuos de que se trate. Estos sistemas de incineración se diseñan o seleccionan a partir de las necesidades particulares del desecho y sus características específicas, donde se deben de cuidar las propiedades químicas, corrosivas y contaminantes de los desechos y residuos de combustión.

A continuación se describen brevemente algunos tipos de incineradores de desechos industriales. Estos incineradores presentan en común ciertos elementos básicos tales como el sistema de alimentación del desecho, estructura de la cámara de combustión con material refractario y cubiertas metálicas, soporte de desecho como parrillas u hogares refractarios, sistema de suministro de aire de combustión, sistema de ductería para los gases de escape y sistema de transporte de residuos incombustibles y equipos de control de contaminación para purificar los gases de escape.

Los tipos de incineradores comunmente usados para procesar desechos industriales son: 1) Incinerador de lecho fluidizado, 2) Incinerador de hogar múltiple, 3) Incinerador de horno eléctrico, 4) Incinerador de horno ciclónico, los cuales se describen brevemente a continuación:

### 1.- Incinerador de lecho fluidizado:

El horno de lecho fluidizado se desarrolló originalmente en los procesos de cracking de petróleo para contactar el catalizador finamente dividido con fracciones de petróleo de alto peso molecular. Posteriormente se enfocó su aplicación hacia la incineración ya que proporciona un rápido calentamiento al material alimentado, temperaturas uniformes y pequeños tiempos de residencia del material.

El incinerador de lecho fluidizado (Ver figura 1.11 ) consiste de un recipiente forrado de material refractario que contiene en la parte inferior material granular inerte, para soportar la fluidización de las partículas de desecho durante la operación. El material granular o arena de fluidización se coloca sobre un plato o parrilla perforada a través de la cual se introduce aire precalentado que al entrar por la parte inferior a alta velocidad expande al lecho de arena y desechos, fluidizándolos, mientras un quemador colocado en la parte superior realiza la combustión de los materiales de desecho. El ducto de gases de escape se encuentra en la parte superior del recipiente, con lo que se tiene un sistema de incineración continua.

La incineración en lecho fluidizado es muy útil para ciertos tipos de desechos lodosos, ( líquidos y sólidos orgánicos en suspensión) y partículas sólidas de dimensiones comprendidas entre 1  $\mu$ m y 10 cm con bajo contenido de humedad. Durante el proceso, el lecho de arena y desechos se mantiene alrededor de 650 a 800 °C , expandiéndose un 30 a 60% en volumen con respecto a su estado original no fluidizado. [ 2, 9 ]

El flujo de aire de combustión debajo de la parrilla debe controlarse de manera que no arrastre arena y desechos hacia el ducto de escape de la cámara de combustión. El requerimiento de aire en exceso es muy pequeño gracias al excedente mezclado del O<sub>2</sub> del aire con los desechos.

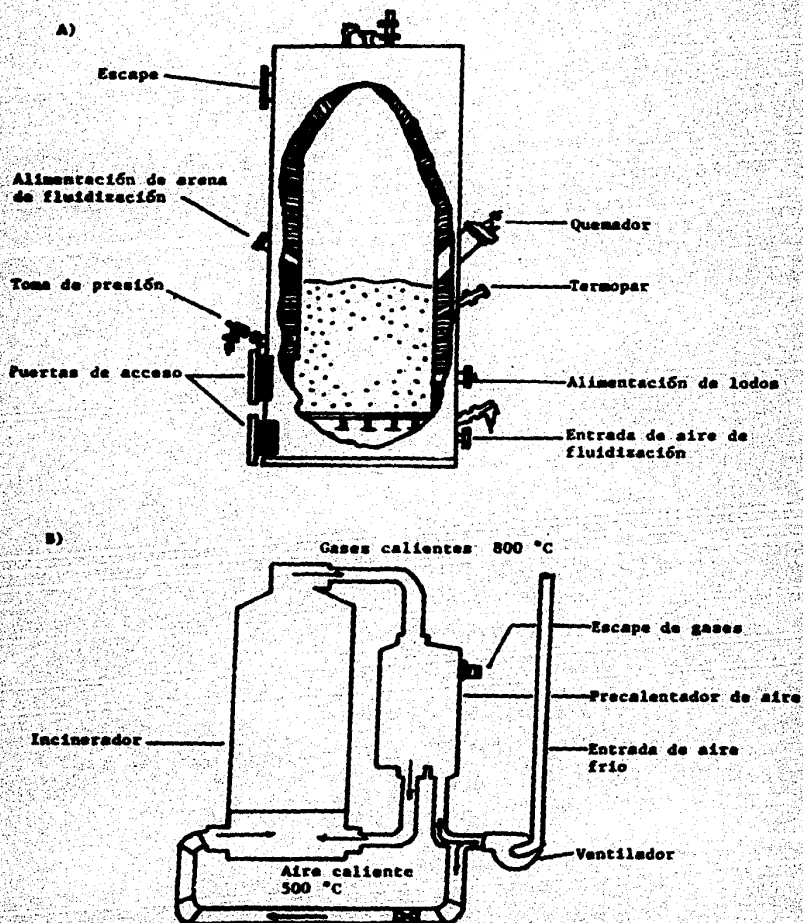


Fig. 1.11 a) Horno de incineración de lecho fluidizado  
b) Sistema de incineración con precalentamiento de aire

## 2.- Incinerador de hogar múltiple:

Este incinerador es uno de los mas utilizados para la disposición final de lodos y materiales de alcantarillados en los Estados Unidos. Los lodos se introducen en la parte superior del horno, el cual consiste de una coraza cilíndrica vertical que contiene de 4 a 12 hogares o cámaras de ladrillo refractario. En el centro tiene un eje tubular de acero, provisto de brazos agitadores, el cual gira con una velocidad de 0.5 a 1.5 r.p.m.. El eje central y los brazos agitadores son enfriados por aire introducido mediante una ventilación forzada desde la parte inferior del sistema. El aire regresa al espacio anular entre el eje y las paredes del horno de la parte inferior para ser utilizado como aire de combustión precalentado. Cada hogar tiene aberturas por las cuales el lodo cae de nivel en nivel, por el centro y el exterior de cada uno de los hogares de manera alternada. Los quemadores de combustible auxiliar generalmente se instalan en los costados del horno a la altura de los hogares o secciones superiores. Los hogares superiores del horno constituyen la zona de secado del desecho, los intermedios la zona de combustión y los inferiores la zona de enfriamiento de los residuos de combustión. La temperatura en estos hornos puede alcanzar hasta 950 a 1000 °C y para asegurar la completa combustión de los sólidos se debe suministrar aire en un exceso del 100 al 125% [ 3 ] . El arrastre de partículas sólidas y gases odoríferos requieren la instalación de equipos purificadores de gases ( Ver parte 1.5) . El incinerador de hogar múltiple tiene gran aplicación ya que puede evaporar grandes cantidades de agua en desechos muy húmedos y presenta una gran versatilidad de operación. ( Ver figura 1.12)

## 3.- Incinerador de horno eléctrico:

El horno eléctrico o de calor radiante es básicamente una banda transportadora que pasa a través de una cámara rectangular forrada de material refractario. ( Ver figura 1.13 ). El aire de combustión se introduce en el extremo de

descarga de cenizas, el cual además es calentado mediante un precalentador externo instalado para recuperar el calor de los gases de combustión del escape.

El sistema térmico para la combustión de los desechos está constituido por elementos eléctricos de calentamiento por radiación infrarroja. Este incinerador es adecuado para pequeñas capacidades de flujo de desechos industriales sólidos y no voluminosos, ( lodos y sólidos pequeños). Los requerimientos de aire en exceso varían del 20 al 30% y las temperaturas alcanzadas en el horno oscilan entre 700 a 850 °C. [ 3 ]

#### 4.- Incinerador de horno ciclónico:

El horno ciclónico está constituido por un horno móvil en donde los brazos agitadores se encuentran estacionarios. El aire de combustión se introduce a través de los quemadores situados tangencialmente a la coraza del horno. El aire caliente junto con la flama del combustible auxiliar crea un violento patrón de flujo en remolino, produciendo un adecuado mezclado entre el aire y el desecho alimentado, el cual está constituido principalmente por diversas clases de lodos industriales que se introducen al horno ciclónico mediante transportadores de tornillo que depositan al desecho en la periferia de la parrilla u hogar rotatorio. Los gases de combustión se dirigen al extremo superior del horno ciclónico saliendo por la parte central de éste. Estos hornos tienen baja capacidad de operación y operan a temperaturas entre los 800 a 900 °C. ( Ver figura 1.14). [ 3,9

En la tabla 1.1 se presenta un cuadro, con el que se puede relacionar el tipo de desecho a quemar con el sistema de incineración más conveniente que se puede aplicar para tal caso. [ 7 ]

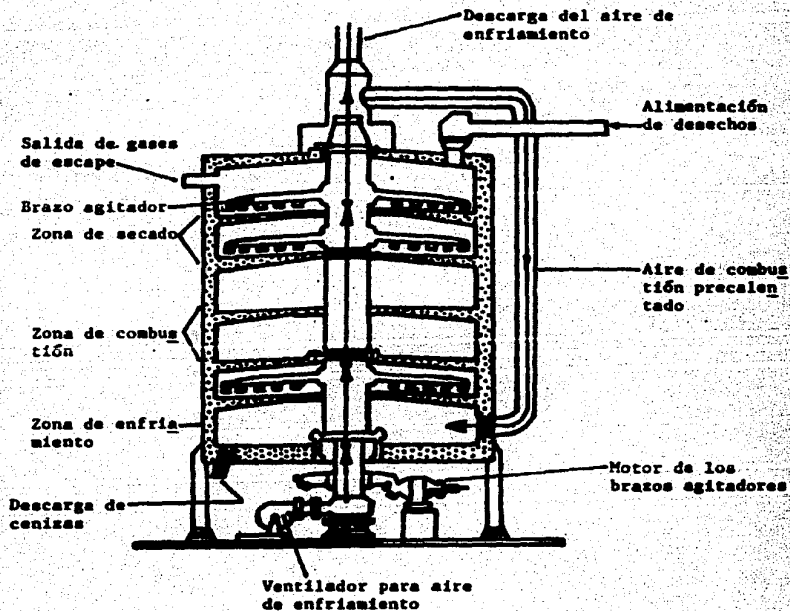


Fig. 1.12 Incinerador de Hogar múltiple



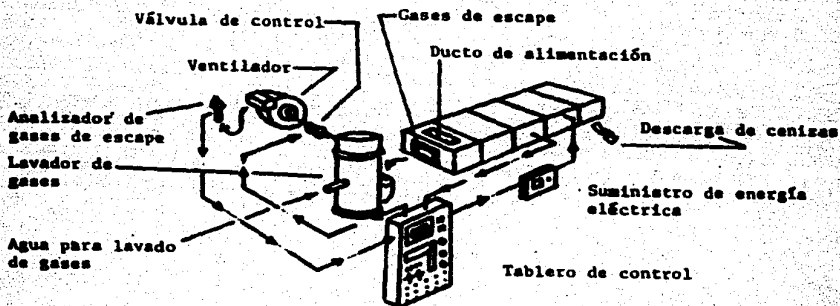


Fig. 1.13 Incinerador de horno eléctrico

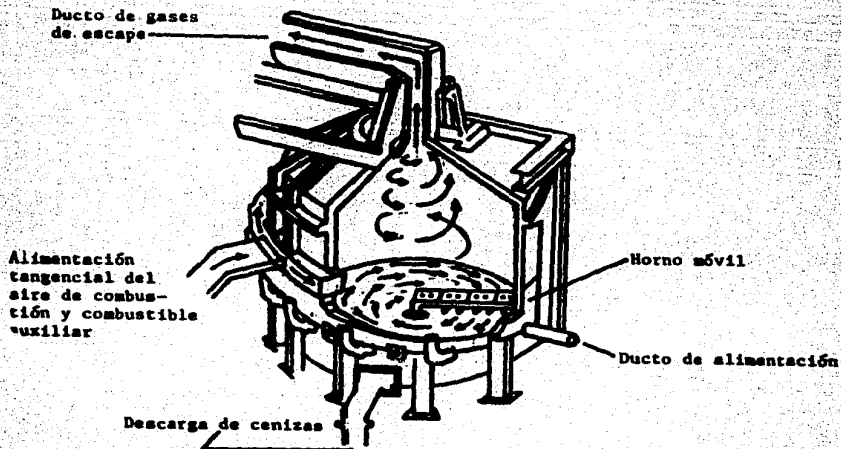


Fig. 1.14 Incinerador de horno ciclónico

Tabla 1.1 Principales sistemas de incineración de desechos recomendados de acuerdo al tipo de residuos a tratar. [ 7 ]

TIPO DE DESECHOS	HORNO MUNICIPAL		Hogar Múltiple Lecho Fluidizado Incinerador	
	Rotatorio	De Parrillas		de líquidos
<b>SOLIDOS</b>				
Granulados homogéneos	X	X	X	X
Voluminosos irregulares	X	X		
Breas de bajo punto de fusión	X			X
Compuestos orgánicos con constituyentes fundibles	X	X	X	
<b>LIQUIDOS</b>				
Desechos acuosos tóxicos con alto contenido de sustancias orgánicas	Sólo si se equipa con boquillas de inyección			X
Líquidos orgánicos	"			X
<b>SOLIDOS/LIQUIDOS</b>				
Desechos lodosos halogenados y con compuestos aromáticos	X			X
Lodos orgánicos acuosos	X	En combinación con desechos sólidos	X	X

Sólo si el material es bombeable

Sólo si la mezcla es bombeable

### 1.3 EQUIPO DE CONTROL DE CONTAMINACION

Como ya vimos, en todos los sistemas de combustión se generan ciertas cantidades y tipos de contaminantes dependiendo de la capacidad del incinerador y el tipo de desecho que se maneja, por lo que se requiere de la instalación de ciertos equipos de purificación de gases conectados al escape de la cámara de combustión de los incineradores de desechos sólidos.

Existen numerosos tipos y tamaños de dispositivos para el control de la contaminación ambiental, los cuales se seleccionan o diseñan en base a los requerimientos legales de emisiones descargadas y las necesidades de protección a la corrosión a los equipos corriente abajo que se utilizan en los incineradores.

Los principales contaminantes producidos en la cámara de combustión de los incineradores que deben ser removidos de la corriente gaseosa son, entre otros: las partículas sólidas, gases orgánicos odoríferos, ácido clorhídrico, óxidos de azufre, etc. Generalmente las demás clases de contaminantes pueden ser removidos con los sistemas instalados para eliminar los cuatro tipos de contaminantes antes mencionados. (En el apéndice 2 se presentan las normas de emisiones gaseosas que se aplican en México, contenidas en el Breviario Jurídico Científico editado por la Secretaría de desarrollo urbano y ecología, SEDUE).

A continuación se describen brevemente los principales equipos utilizados para purificar los gases de combustión de los incineradores: [ 21 ]

#### 1.- Post-quemadores:

El post-quemador no es más que una cámara de combustión secundaria empleada para destruir por oxidación los hidrocarburos gaseosos o materiales orgánicos no destruidos en el incinerador. Existen tres tipos principales de post-quemadores: 1) De flama directa, 2) Térmicos, 3) Catalíticos. Los post-quemadores de flama directa y térmicos son similares pero destruyen los vapores orgánicos de diferentes maneras. En las unidades de flama directa, los vapores orgánicos

pasan directamente a través de ella y en las unidades térmicas los vapores permanecen en una atmósfera oxidante a alta temperatura el tiempo suficiente para que se lleven a cabo las reacciones de oxidación. Los dispositivos catalíticos son equipos térmicos que contienen una superficie de catalizador para acelerar las reacciones de oxidación. Los dispositivos térmicos y de flama directa proporcionan mayor flexibilidad a la operación del incinerador mientras que los catalíticos son menos versátiles ya que llevan a cabo la combustión a menor temperatura. Las temperaturas de operación varían de 650 a 1300 °C y el tiempo de residencia oscila entre 0.2 a 6.0 segundos, dependiendo del tipo de contaminante en la corriente de gases de combustión. En oxidaciones catalíticas el tiempo de residencia de los gases es aproximadamente un segundo. [ 1 ]

El post- quemador se utiliza principalmente cuando se requiere destruir contaminantes orgánicos que no se quemaron en el incinerador primario y cuando se desea una mayor flexibilidad en la operación del incinerador para que este procese más tipos de desechos. (Ver figura 1.15).

## 2.- Cámaras de asentamiento:

Estas cámaras están diseñadas para reducir la velocidad de los gases de combustión mediante una expansión para promover el asentamiento de las partículas sólidas y cenizas volátiles arrastradas por la corriente de gases y así separarlas de ella. Se utiliza generalmente para partículas mayores a 40  $\mu\text{m}$ . (Ver parte 2.2 donde se hace referencia a la ley de Stokes y la velocidad de asentamiento de partículas sólidas en corrientes gaseosas). Además algunas de estas cámaras están provistas de mamparas en las que chocan las partículas, facilitándose así su separación. Estas cámaras son efectivas para partículas mayores a 15  $\mu\text{m}$ . En general, las cámaras de asentamiento no tienen un uso práctico como dispositivos de control de contaminación, por lo que sólo se utilizan como parte de un sistema de purificación previo para remover las partículas mas

grandes generadas durante la operación.

### 3.- Separador ciclónico:

El ciclón es un separador inercial en el que se introducen los gases de combustión de forma tangencial al recipiente cilíndrico y en la parte superior de éste, produciéndose un flujo en remolino hacia abajo, mediante el cual salen las partículas sólidas por un orificio inferior mientras los gases regresan a la parte superior para salir por ella en ducto central de la tapa del ciclón. Este equipo es útil para separar partículas mayores a  $15 \mu\text{m}$ , y se aplica para remover partículas grandes como parte de un tratamiento previo a los gases sucios antes de que estos entren a equipos despolvadores mas eficientes tales como los precipitadores electrostáticos. En ocasiones, las partículas sólidas recolectadas pueden ser realimentadas al horno para completar su combustión.

El problema de los separadores ciclónicos es que cuando la carga de polvos es muy grande o los polvos son materiales higroscópicos o pegajosos, estos tienden a aglomerarse en las paredes del ciclón sin caer adecuadamente por el ducto de descarga. (Ver figura 1.16)

### 4.- Lavador de gases por aspersion, tipo vénturi:

Los lavadores de gas tipo vénturi utilizan la energía cinética de la corriente de gases de combustión para atomizar el líquido de lavado y convertirlo en pequeñas gotas que son capaces de arrastrar las partículas sólidas y disolver una serie de contaminantes de los gases de escape tales como óxido de azufre , óxidos de nitrógeno , HCL, HF, etc.

En el lavador tipo vénturi, el líquido de lavado (generalmente agua) se inyecta en la corriente de gases de escape a la altura de la garganta del vénturi. En el proceso, el líquido se atomiza creándose una gran superficie de transferencia de masa para arrastrar los contaminantes de los gases de escape. El lavador tipo

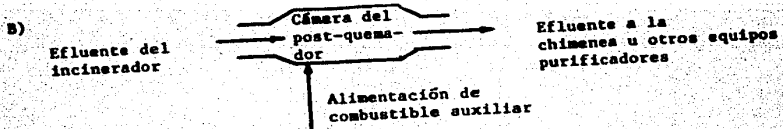
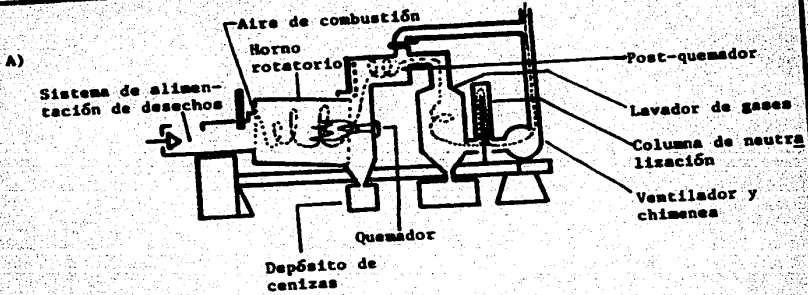


Fig. 1.15 a) Sistema de incineración con post-quemador  
 b) Diagrama de flujo de la operación del post-quemador

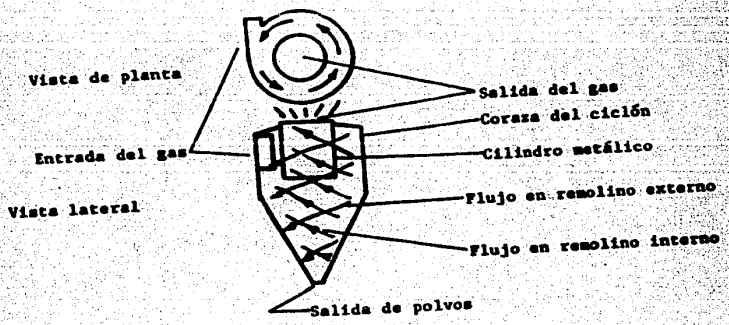


Fig. 1.16 Separador ciclónico

vénturi se utiliza cuando se necesita remover simultáneamente polvos y gases tóxicos solubles en agua u otro líquido de lavado tal como algunas soluciones acuosas alcalinas para neutralizar los gases ácidos. También se aplica para altas temperaturas y altos contenidos de humedad en los gases de combustión. Además aparece comunmente en incineradores de horno rotatorio y de inyección de residuos líquidos (Ver figura 1.17). [ 26 ]

#### 5.- Torre lavadora por aspersión:

Son equipos en los que los contaminantes son eliminados por un proceso de absorción de gases y arrastre mecánico efectuados por el líquido asperado, lo cual asemeja al equipo con los lavadores tipo vénturi pero que difiere en funcionamiento por el sistema de atomización del líquido de lavado. El líquido lavador se atomiza a alta presión a través de unas espesas desde la parte superior de un recipiente cilíndrico, mientras que los gases se introducen desde la parte inferior. Las pequeñas gotas del líquido lavador constituyen la fase dispersa, mientras que la corriente de gases forman la fase continua, ocurriendo la transferencia de masa en la superficie de las gotas del líquido.

Estas torres lavadoras se aplican también en la incineración de desechos tóxicos y presenta relativamente buenas eficiencias de remoción tanto de polvo como de gases tóxicos, HCl, HF, NOx, SOx, etc. También se utilizan para cargas gaseosas a baja velocidad, a elevadas temperaturas y contenido de humedad alto y con grandes cantidades de polvos. (Ver figura 1.18)

#### 6.- Eliminadores de niebla:

Los eliminadores de niebla son equipos que remueven las gotas de agua arrastradas por el gas en los equipos de lavado por aspersión, reduciendo así la humedad que entra en los ventiladores de tiro inducido del sistema, además de eliminar la mala impresión que causan las pequeñas gotas de agua condensada que salen por las chimeneas. Los eliminadores de niebla consiste básicamente de un cilindro

metálico que en su interior contiene mamparas o baffles a través de los cuales pasa el gas, reteniéndose en ellos las partículas de agua más grandes. El gas se introduce por la parte inferior y las gotas retenidas caen hacia el fondo del recipiente liberando así a la corriente de gases de la nebulosidad adquirida en los equipos lavadores de aspersión de agua. Los eliminadores de niebla se utilizan como equipos adicionales de los lavadores de gases por medio de la aspersión de líquido. (Ver figura 1.19).

#### 7.- Torre lavadora de lecho empacado:

Consiste básicamente de una torre de absorción de gases de lecho empacado, donde los contaminantes gaseosos se remueven por un proceso de absorción de gases mediante un contacto líquido/gas. Estos lavadores son simples recipientes, los cuales se llenan de material de empaque sobre un plato soporte. El líquido de lavado se alimenta por la parte superior mientras que el gas fluye a contracorriente. Esos equipos se utilizan cuando los gases de escape no contienen grandes cantidades de partículas sólidas. Además tienen una gran eficiencia de remoción de contaminantes gaseosos tales como el HCl, HF, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, etc. En estos equipos también se requiere de la instalación de eliminadores de niebla en la corriente de salida de los gases. (Ver figura 1.20)

#### 8.- Torre lavadora con sistema de platos:

Es una torre de platos que basa su funcionamiento en la absorción de contaminantes mediante un líquido de lavado. Está constituida básicamente por una columna cilíndrica que contiene platos en su interior, en los cuales se realiza el contacto líquido-gas para efectuar la transferencia de materia. El líquido de lavado se introduce en el plato superior, desplazándose a los platos inferiores y atrapando los contaminantes de la corriente de gas que fluye a contracorriente a través de unas perforaciones hechas en los platos.



Estos equipos no se utilizan tan comunmente como los lavadores tipo venturi o las torres de lecho empacado pero sin embargo se aplica para controlar las emisiones de incineradores de lodos o de desechos líquidos. Al igual que las torres de lecho empacado, son útiles para remover gases tóxicos de corrientes gaseosas que no contengan grandes cargas de polvos. En estos equipos lavadores, el líquido utilizado puede ser agua o soluciones alcalinas que ayudan a neutralizar los contaminantes gaseosos de carácter ácido. (Ver figura 1.21).

#### 9.- Precipitador electrostático:

Los precipitadores electrostáticos o electrofiltros son equipos que remueven las partículas sólidas y polvos de la corriente de gases y escape y que además presentan una muy alta eficiencia de recolección. El precipitador electrostático es fundamentalmente una caja metálica en la que la corriente de gases pasa a través de una serie de electrodos de descarga cargados negativamente. El alto voltaje aplicado provoca la inducción de carga negativa en las partículas sólidas que pasan a través de los electrodos. Las partículas quedan atrapadas en un electrodo colector de gran área que está conectado a tierra. El polvo finalmente es desprendido de los electrodos colectores mediante un movimiento vibratorio de éstos, provocando la caída de los polvos hacia un depósito inferior.

El precipitador electrostático es muy eficiente para un amplio rango de tamaño de partícula, incluyendo hasta partículas de menos de  $1 \mu\text{m}$  de diámetro. Este equipo se aplica para la recolección de polvos en seco y tiene gran utilidad en sistemas de incineración municipal e industrial. No se aplica para remover gases contaminantes, ni para partículas de alta resistividad eléctrica. (Ver figura 1.22).

#### 10.- Filtros:

Los filtros son equipos que prevalecen en todo tipo de aplicaciones indus-

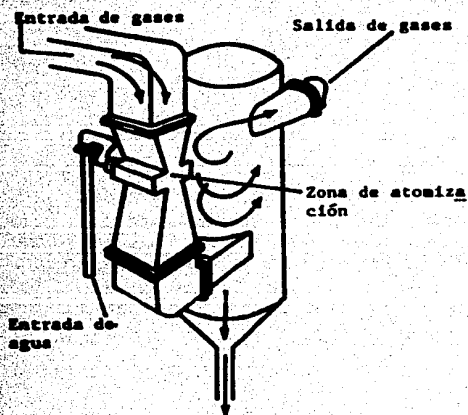


Fig. 1.17 Lavador de gases tipo venturi

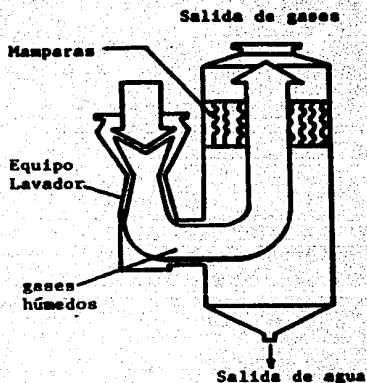


Fig. 1.19 Eliminador de niebla

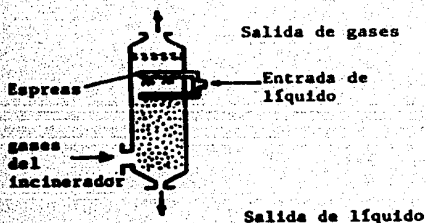


Fig. 1.18 Torre de aspersión

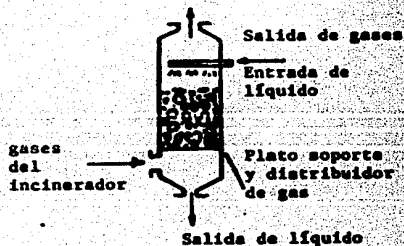


Fig. 1.20 Torre lavadora de lecho empacado

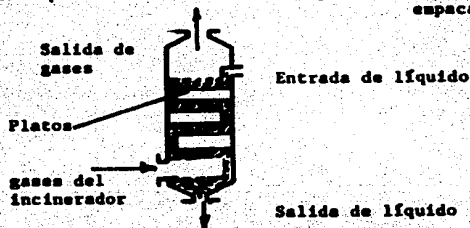


Fig. Torre lavadora con sistema de platos

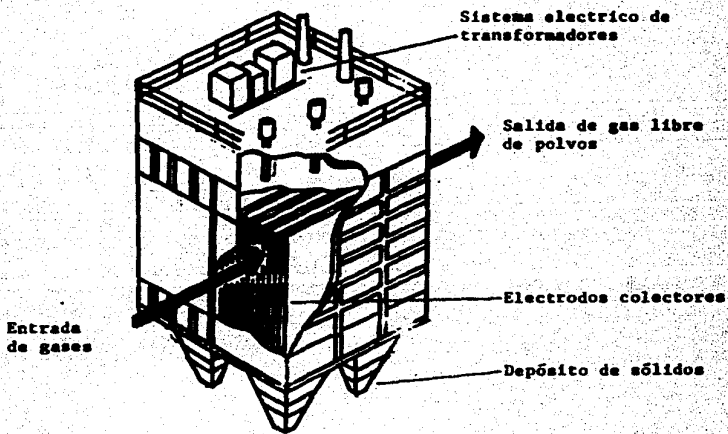


Fig. 1.22 Precipitador electrostático

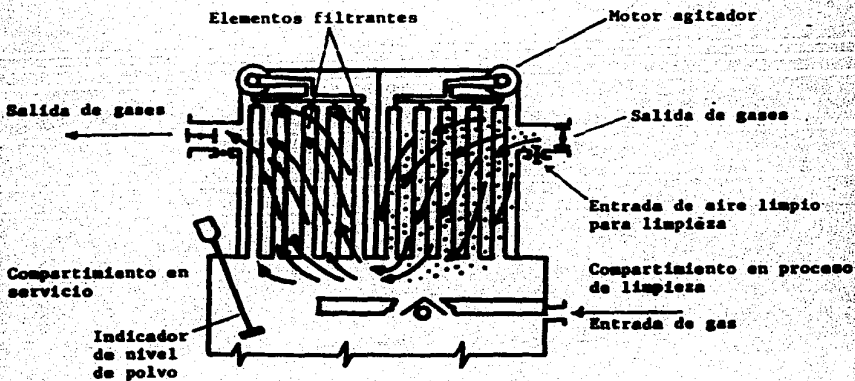


Fig. 1.23 Filtro de gases con sistema de agitación para la separación de polvos

triales incluyendo a la incineración. Los filtros están constituidos por un recipiente que puede ser de diversas formas y que en su interior contiene una serie de sacos permeables que permiten el paso de los gases pero no el de las partículas sólidas. Estos equipos son efectivos para tamaños de partículas en el rango de las submicras gracias a las telas utilizadas para hacer los sacos de los filtros tales como el algodón, lana, fibra de vidrio, etc. Estos materiales aumentan su resistencia al flujo de gases conforme aumenta la cantidad de polvo coleccionado en los sacos del filtro; para evitar esto, existen varios métodos por medio de los cuales se eliminan periódicamente o continuamente los sólidos. Algunos consisten en mecanismos de agitación que provocan el desprendimiento de los polvos que van a caer al fondo de un depósito, otros métodos consisten en parar la operación de filtrado en un momento determinado para después inducir una corriente de gas en el interior del filtro en dirección contraria a la normal y con cierta presión para poder descargar los polvos acumulados en la superficie externa de los sacos. ( Ver figura 1.23 )

En la tabla 1.2 se presenta una relación comparativa de las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de equipos purificadores de corrientes gaseosas. Las ventajas y desventajas se determinan de acuerdo a la conveniencia de las características de operación de los equipos lo cual involucra a los siguientes factores:

**FACTORES:**

Condiciones de operación

**TIPO:**

- Caidas de presión
- Nivel de temperatura
- Humedad en los gases
- Requerimiento de sistemas de control
- Riesgos de operación

## FACTORES:

## TIPO:

Diseño del equipo

--Requerimiento de espacio de  
instalación

--Simplicidad del diseño

--Simplicidad de construcción y  
mantenimiento

--Costo

Capacidad del equipo

--Capacidad de manejo de gases

--Eficiencia de remoción de agentes  
contaminantes, tanto sólidos como  
gases

Tabla 1.2 Ventajas y desventajas de los equipos  
anticontaminantes.

Tipo de equipo	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Colector gravita- cional.</b> ( Camaras de a- sentamiento )	Bajas caídas de presión, di- seño simple y fácil manteni- miento	Requerimiento de mucho espacio de instalación y baja eficien- cia de colección
<b>Ciclón</b>	--Diseño simple y fácil man- tenimiento, poco requerimien- to de espacio --Separación continua de pol- vos colectados en seco --Caídas de presión modera- das --Manejo de partículas gran- des y de altas cargas de pol- vo sin afectarse por altas temperaturas	--Requiere de sistemas de ins- trumentación y control --Baja eficiencia de colección de partículas pequeñas

(continúa)

Tabla 1.1

Tipo de equipo	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Colectores húmedos ( torres de aspersión o absorción )	<ul style="list-style-type: none"> <li>--Absorción y remoción simultánea de gases tóxicos y partículas sólidas.</li> <li>--Capacidad de enfriamiento y lavado de gases húmedos a altas temperaturas</li> <li>--Recuperación y neutralización de gases corrosivos</li> <li>--Riesgos reducidos de explosión</li> <li>--Eficiencias variables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>--Problemas de erosión y corrosión en el equipo</li> <li>--Costo adicional de tratamiento de aguas</li> <li>--Baja eficiencia para partículas submicrométricas</li> <li>--Inefectivo para materiales hidrofóbicos</li> <li>--Emisiones visibles de vapor de agua</li> <li>--Contaminación del efluente gaseoso por arrastre del líquido de lavado</li> </ul>
Precipitador electrostático	<ul style="list-style-type: none"> <li>--Se obtiene una eficiencia mayor al 99% en recolección de partículas sólidas</li> <li>--Se pueden coleccionar partículas muy pequeñas</li> <li>--Se pueden coleccionar partículas secas o húmedas</li> <li>--La caída de presión es pequeña y puede operar a altas temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>--Relativamente alto costo inicial</li> <li>--Los precipitadores son sensibles a las variaciones en la carga de polvos y el flujo de gases</li> <li>--Riesgos por alto voltaje</li> <li>--La resistividad causa que algunos materiales no sean coleccionados adecuadamente</li> </ul>
Filtros de tela	<ul style="list-style-type: none"> <li>--Posibilidad de colección de partículas sólidas en seco</li> <li>--Alta eficiencia</li> <li>--Se pueden coleccionar partículas pequeñas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>--La operación es sensible a la velocidad de filtrado y a las condiciones de humedad</li> <li>--Requiere de enfriamiento previo de los gases</li> <li>--Corrosión del elemento filtrante por agentes químicos</li> </ul>
Post-quemadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>--Alta eficiencia de remoción de pequeñas partículas sólidas odoríferas</li> <li>--Eliminación simultánea de gases combustibles y partículas sólidas</li> <li>--Relativamente bajos requerimiento de espacio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>--Solo eliminan materiales combustibles</li> <li>--Si se trata de post-quemadores de lecho catalítico, éste es fácilmente envenenable</li> </ul>

## CAPITULO 2

### VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE INCINERACION

#### 2.1 PROPIEDADES DE LOS DESECHOS SOLIDOS

El conocimiento de las propiedades fisicoquímicas de los desechos sólidos es fundamental para poder llevar a cabo el diseño y evaluación del incinerador. Para conocer estas características de los desechos, existen tablas en donde se establecen aproximadamente los valores y rangos en los que se encuentran los diferentes parámetros de interés de muchos tipos de desecho, tales como su composición elemental, contenido de cenizas incombustibles, contenido de humedad, densidad, forma, tamaño, poder calorífico de combustión, etc.

Para iniciar la investigación de las propiedades del desecho es necesario primero definir que tipo de desecho o basura se desean incinerar estableciendo las diferentes categorías de materiales de los cuales está constituida. Esta descripción aproximada de los desechos es un requisito mínimo del cual se parte para determinar aproximadamente todo un conjunto de valores de las diferentes propiedades que presenta el desecho. [ 2 ]

Generalmente los desechos municipales se categorizan como se muestra en la tabla 2.1. En los E.U. se ha encontrado una gran variación en la composición de los desechos a través de los diferentes estados y municipios, reflejando el tipo de actividad, efectos climatológicos, industrialización y nivel económico de la zona.

Normalmente, la generación de desechos industriales es de mayor volumen y de mayor impacto ambiental que la de los desechos municipales; Ahora bien, la información tanto de desechos industriales y comerciales es difícil de generalizar y obtener debido a los siguientes factores:

-- Los establecimientos de manufactura, aún aquellos del mismo tipo, pueden diferir bastante en cuanto a sus prácticas de generación de desechos.

-- La mayoría de las empresas se rehusan a revelar datos y estadísticas relacionados con la producción por temor a ser utilizados por la competencia.

-- Algunas firmas no proporcionan información sobre la composición y volúmenes de sus desechos por temor a descubrir o mostrar algún incumplimiento con las regulaciones legales de control de la contaminación.

-- Algunas actividades industriales están sujetas a fluctuaciones estacionales, además muchas firmas no conocen realmente su propia capacidad de generación y características de desechos producidos.

-- Las políticas de recuperación, reciclado y compra-venta de desechos varía entre las diferentes empresas

Tabla 2.1: Principales categorías de basura en desechos municipales

CATEGORIA	DESCRIPCION
vidrio	-- botellas (principalmente)
metal	-- latas, alambres, laminas
papel	-- cartoncillo, periódicos, etc.
plásticos	-- cloruro de polivinilo, polietileno, estireno; presentes en envases, artículos domésticos, accesorios, jugates, etc.
cuero, caucho	-- zapatos, jugates, neumáticos
textiles	-- telas naturales y sintéticas, celulósicas y protéicas
madera	-- empaques de madera, muebles, artículos de madera en general
desechos de alimentos	-- basura y desperdicios de materiales <u>comestibles</u>
miscelánea	-- cenizas inorgánicas, piedras, polvo
desechos de parques y jardines	-- residuos de la poda de arbustos, césped, etc.



La composición categórica de los desechos (Tabla 2.1) es un punto de partida para el desarrollo de los parámetros de interés del diseñador de incineradores, tales como la composición química analítica y el contenido calorífico de la basura a tratar. [ 38 ]

El paso de un análisis categórico del desecho a un análisis químico proporciona las bases para los cálculos estequiométricos de la combustión. En la tabla 2.2 se presenta la composición química de los elementos para las diferentes categorías de desecho municipal. La información fué desarrollada por W. R. Niessen utilizando datos experimentales desarrollados en 1970. En dicha tabla, el % de carbón fijado representa la fracción de material combustible que permanece aún después de realizada la incineración.

#### Parámetros característicos de los desechos sólidos:

- 1.- Parámetros generales: Composición en peso de las fracciones del desecho, incluyendo los porcentajes de las diferentes categorías tales como papel, metales, vidrio y desechos especiales, además de las fracciones relativas al proceso de incineración como los porcentajes de materiales combustibles, no combustibles, materiales recuperables, etc.
- 2.- Parámetros físicos: Forma y tamaño aproximado de los desechos, peso, densidad, edad, olor, fracción hueca en el desecho, temperaturas de generación y almacenamiento, compactibilidad, estado físico, etc. Para el caso de desechos sólidos se incluye su solubilidad, combustibilidad, calor específico, conductividad calorífica, fracción de cenizas volátiles, forma, punto de fusión, contenido de humedad.
- 3.- Parámetros químicos-termodinámicos: En general, son la composición de sus constituyentes químicos, el valor o poder calorífico de los desechos, la composición de los productos de combustión, la fracción orgánica e inorgánica, etc.
- 4.- Características contaminantes: Contenido y composición de los agentes con-

CATEGORIA	C	H	O	N	Cenizas	S	Fe	Al	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Cl	Se	% de carbón fijado (base seca)
Metal	4.5	0.6	4.3	0.05	90.5	0.01	77.3	20.1	2.0	-	0.01	0.6	0.03	-	-	0.5
Papel	45.4	6.1	42.1	0.3	6.0	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	trazas	11.3
Plásticos	59.8	8.3	19.0	1.0	11.6	0.3	-	-	-	-	-	-	0.01	6.0	-	5.1
Cuero, caucho							-	-	-	2.0	-	-	-	-	-	6.4
Textiles	46.2	6.4	41.8	2.2	3.2	0.2	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	3.9
Madera	48.3	6.0	42.4	0.3	2.9	0.11	-	-	-	-	-	-	0.05	-	-	14.1
Desecho de alimentos	41.7	5.8	27.6	2.8	21.9	0.25	-	-	-	-	-	-	0.24	-	-	5.3
Desechos de parques y jardines	49.2	6.5	36.1	2.9	5.0	0.35	-	-	-	-	-	-	0.04	-	-	19.3
vidrio	0.52	0.07	0.36	0.03	99.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4
Miscelánea	13.0	2.0	12.0	3.0	70.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.5

Tabla 2.2 Análisis químico de las diferentes categorías de desechos municipales ( % en peso en base seca )

tenientes, definición de las restricciones y disposiciones legales sobre el transporte y manejo de los desechos, especialmente en el caso de que estos sean tóxicos.

En la tabla 2.3 se encuentran tabulados los valores de densidad de desechos según la clasificación hecha por el Instituto de Incineradores de América, I I A ( de los E.U.). [ 17 ]

Tabla 2.3 Densidad promedio de desechos sólidos

TIPO *	Kg/m <sup>3</sup>
Desecho tipo 0	130 - 160
Desecho tipo 1	130 - 160
Desecho tipo 2	240 - 320
Desecho tipo 3	480 - 560
Desecho tipo 4	720 - 880
Revistas, bultos de papel	560 - 800
Papel suelto	80 - 110
Pedazos de madera y aserrín	190 - 240

\* Ver la descripción de los diferentes tipos en la tabla 2.4

De Long desarrolló una ecuación empírica mediante la cual se puede determinar el poder calorífico de materiales combustibles, la cual se puede utilizar para aproximar con cierta desviación el poder calorífico de desechos sólidos. Este parámetro Q se obtiene a partir de los valores C, H, O y S que representan la fracción en peso del carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre contenidos en el desecho.

$$Q = 8080C + 34460(H_2 - 0.125O_2) + 2250S \quad . . . . 2.1$$

donde Q = poder calorífico superior, Kcal/ Kg

La clasificación general de los diferentes tipos de desecho según el IIA se encuentran en la tabla 2.4. Otras propiedades importantes de los desechos sólidos son el contenido de humedad así como el poder calorífico que presentan para ayudar a la combustión. En la tabla 2.4 se muestran los valores aproximados de estas propiedades para los diferentes tipos de desecho, además de otros parámetros tal como los requerimientos de combustible auxiliar para asegurar la completa incineración de los materiales.

El conocimiento aproximado de las anteriores propiedades fisicoquímicas de los desechos y algunas otras características, es necesario para poder llevar a cabo el diseño de los sistemas de incineración, ya que se utilizan principalmente para el dimensionamiento de la cámara de combustión, el diseño del sistema de transporte de basura en la misma, así como la determinación de los requerimientos de combustible auxiliar. Estos parámetros y propiedades de los desechos se pueden obtener mediante un análisis de laboratorio aplicado a los desechos, pero cuando este tipo de análisis no se puede realizar, las propiedades de un desecho determinado se pueden aproximar y estimar recurriendo a la información existente sobre otros desechos de tipo similar.

## 2.2 EMISION DE PARTICULAS SOLIDAS

El contenido de cenizas incombustibles en el desecho y la emisión de las mismas en el proceso de combustión, son de fundamental importancia para poder realizar el diseño del sistema de parrillas en incineradores municipales, así como el diseño o selección del equipo de purificación de gases a la salida de la cámara de combustión.

Clasificación de desechos	Componentes principales	Composición aproximada	Contenido de humedad	Sólidos incombustibles	Valor calorífico	Kcalorias de combustible auxiliar por Kg de desecho para cálculos de combustión	Alimentación de Kcal/hr en el quemador por Kg de desecho
Tipo Descripción		% en peso	% en peso	% en peso	Kcal/Kg		
0 basura combustible	residuo altamente combustible: papel, madera, cartón, plásticos, gomas; de fuentes comerciales e industriales	100% basura combustible	10%	5%	4700	0	0
1 basura semi combustible	residuos combustibles papel, cartón, pedazos de madera y telas	basura semi combustible 80%	25%	10%	3600	0	0
2 desechos domésticos	residuos de limpieza doméstica; fuentes domésticas, comerciales	desechos de alimentos 20%					
	basura y desechos domésticos de fuentes residenciales	basura semi-combustible 50%	50%	7%	2400	0	800
		desechos de alimentos 50%					
3 desechos de alimentos	residuos alimenticios animales y vegetales de hoteles, restaurantes, mercados, etc. fuentes comerciales	desechos de alimentos 65% basura semi-combustible 35%	70%	5%	1400	800	1600
4 residuos hospitalarios	cadáveres, tejido animal y humano, desechos de laboratorios, rastros, etc.	100% tejido animal y humano	85%	5%	500	1600	8000
5 residuos gaseosos, líquidos	residuos de procesos industriales	variable	depende de los componentes	variable según el análisis del desecho	variable según el análisis del desecho	variable según el análisis del desecho	variable según el análisis del desecho
6 residuos especiales	combustibles que requieren equipo especial	variable					

Tabla 2.4 Clasificación de desechos. I I A

En el proceso de combustión de quemado en tiza, el desecho-combustible se eleva a través de la cámara de combustión sobre una parrilla, donde la introducción de aire de combustión a través de ella proporciona un mecanismo por medio del cual las cenizas pueden ser fluidizadas y transportadas con los gases de escape. Este mecanismo prevalece cuando se presentan desechos con alto contenido de cenizas finas o elevadas velocidades del aire bajo las parrillas y otros factores que induzcan altas velocidades en los gases que pasan a través y sobre el lecho de basura. Estos factores secundarios incluyen a la agitación proporcionada al lecho y a la volatilización de sales u óxidos metálicos.

Los sistemas de parrillas con grandes pasajes de aire tienden a reducir la emisión de polvos ya que estos caen a través de las aberturas de las parrillas en movimiento. A continuación se presenta un breve análisis de los factores que influyen en la emisión de partículas sólidas en incineradores.

#### a) Contenido de cenizas en el desecho.

Las partículas de ceniza pueden ser fluidizadas y transportadas cuando la velocidad de los gases a través del lecho de basura excede la velocidad terminal o de asentamiento de partículas, la cual se calcula utilizando la ley de Stokes. Ecuación 2.2

$$U_t = \sqrt{\frac{4d(p_s - p_a)g}{3\mu C_x}} \quad [2] \quad \text{la cual es equivalente a :}$$

$$U_t = \frac{d^2 (p_s - p_a) g}{18\mu} \quad \dots \quad 2.2$$

donde:  $U_t$  = velocidad terminal, m/s (asentamiento de partículas)  
 $g$  = constante gravitacional, m/s<sup>2</sup>  
 $d$  = diámetro de partícula, m  
 $\mu$  = viscosidad del gas, Kg/m-seg  
 $p_s$  = densidad de la partícula, Kg/m<sup>3</sup>  
 $C_x$  = coeficiente de arrastre, adimensional (función de la forma y  $Re$ )  
 $p_a$  = densidad del gas, Kg/m<sup>3</sup>

La primera ecuación está expresada en función del coeficiente de arrastre el cual depende del número de Reynolds.

$$Re = \frac{d U_t p_a}{\mu} \quad \dots \quad 2.3$$

$$C_x = \frac{24}{NRe} \quad \text{si } NRe \leq 2.0 \quad \dots \dots \dots 2.4$$

$$C_x = \frac{24}{NRe} (1 + 0.15 NRe^{0.687}) \quad \text{si } 2.0 < NRe \leq 800 \quad [ 2 ] \quad \dots \dots 2.5$$

En los incineradores municipales las velocidades del aire de combustión bajo la parrilla varían normalmente desde 0.05 m<sup>3</sup>/seg m<sup>2</sup> hasta 0.5 m<sup>3</sup>/seg m<sup>2</sup> de área de parrilla. [ 7 ]

El mecanismo postulado del arrastre y fluidización de partículas se fundamenta en el intervalo de tamaños de partículas observado de 30 a 900 µm en los experimentos realizados por Aberhardt, Mayer y Nowak [ 2 ], de donde se sacan las siguientes conclusiones: 1) Se presenta un incremento en las emisiones de partículas debido a un incremento en el contenido de cenizas del desecho. 2) Hay aumento en las emisiones debido a que se incrementa la velocidad del aire de combustión que se introduce bajo la parrilla. 3) Existe similitud en el análisis químico entre las cenizas volátiles y las cenizas presentes originalmente en el desecho. Una evaluación empírica de la distribución del tamaño de partículas muestra que el 70% de las mismas son menores a 250 µm en desechos municipales.

En la tabla 2.5 se comparan tanto el contenido de ceniza en el desecho como el porcentaje del aire total de combustión utilizado bajo la parrilla ( datos obtenidos en incineradores de Nueva York ) [ 37 ]. Podemos ver que para grandes porcentajes de aire suministrado bajo las parrillas, los porcentajes de cenizas arrastradas con los gases de combustión son aproximadamente los mismos para los dos tipos de desecho y oscilan entre 8 y 22%. Sin embargo para flujos de aire pequeños bajo la parrilla, el porcentaje de cenizas arrastradas son menores y el proceso de emisión es más deficiente para el desecho con alto contenido de cenizas. Estos hallazgos muestran que el contenido de ceniza en el desecho es el principal factor que determina las razones de emisión y que el porcentaje de ceniza arrastrada permanece la mayoría de las veces entre el 10 y 20% del total de cenizas en el desecho.

La composición de las cenizas volátiles se puede tomar de la composición de cenizas de los constituyentes del desecho, ya que generalmente no ocurren arrastres selectivos de las partículas sólidas. La composición de las cenizas volátiles así emitidas son comparadas en la tabla 2.6 con datos del análisis de la composición de las cenizas en el desecho y en los gases de escape de dos incineradores de la ciudad de N.Y. [ 37 ], utilizando para ello desecho municipal. En dicha tabla se nota la concordancia entre la composición de las cenizas volátiles en el escape y las del residuo tratado, en donde las principales diferencias están en los óxidos de fierro, aluminio y azufre, los cuales presentan altos porcentajes en las cenizas volátiles en el escape. Una posible explicación es la oxidación de la mayor parte de las piezas de aluminio y fierro presentes en el desecho, y el alto contenido de azufre se puede deber al sulfato de calcio contenido en piezas de cartón y de yeso.

Tabla 2.5 Efecto del contenido de cenizas y aire suministrado bajo las parrillas en los factores de emisión de partículas.

Contenido de cenizas en el desecho (%)	% de aire de combustión suministrado bajo la parrilla	Emisión de sólidos Kg/ tonelada de desecho	% de ceniza del desecho emitida
2.0	15	0.57-2.19	2.74-11
2.0	60	1.55-4.46	7.75-22
7.5	15	0.74-1.86	1.0-2.3
7.5	60	6.61-15.83	8.8-21

Las consideraciones anteriores se aplican solo a partículas o cenizas finas menores a 400  $\mu$ m correspondiente al diámetro equivalente a la esfera que tenga la misma masa de partícula, ya que eficientemente son las más susceptibles a ser arrastradas por corrientes gaseosas.

En la práctica, las partículas pueden tener un sinfín de formas y tamaños



Composición de componentes inorgánicos  
en los gases de escape.  
Incineradores en N. Y.

Componente	Composición típica en el desecho	Composición de componentes inorgánicos en los gases de escape. Incineradores en N. Y.	
		Calle 73 Manhattan	Costa de Long Island
$SiO_2$	53.0	46.4	55.5
$Al_2O_3$	6.2	28.2	20.5
$Fe_2O_3$	2.6	7.1	6.0
$CaO$	14.8	10.6	7.8
$MgO$	9.3	2.9	1.9
$Na_2O$	4.3	3.0	7.0
$K_2O$	3.5	2.3	-
$TiO_2$	4.2	3.1	-
$SO_3$	0.1	2.7	2.3
$P_2O_5$	1.5	-	-
$ZnO$	0.4	-	-
$BaO$	0.1	-	-

Tabla 2.6 Composición (X en peso) de componentes  
inorgánicos en cenizas volátiles

tal como las piezas delgadas de papel carbonizado, las cuales no entran en los análisis descritos en las tablas 2.5 y 2.6.

b) Flujo de aire bajo la parrilla

Estudios experimentales sobre el efecto de ciertos factores tales como el aire bajo la parrilla, aire secundario, exceso de aire, velocidad de carga del desecho, intervalo de alimentación y humedad del desecho, realizados por PHS - ( Public Health Service ) llevaron a la conclusión de que, de las variables anteriormente mencionadas, la que mas influencia la razón de emisión de cenizas es la velocidad de aire bajo las parrillas.

Stanburg y Horsley [ 2 ] llegaron a la siguiente correlación para desecho con un 25 a 50% de humedad:

$$W = 4.35 V^{0.543} \dots \dots 1.6$$

donde W = factor de emisión expresado en Kg de partículas por tonelada de desecho incinerado.

V = flujo de aire bajo la parrilla en  $m^3/seg m^2$  del área de la parrilla.

El intervalo de velocidades de aire bajo la parrilla estudiado varía de 0.01 a  $0.5 m^3/seg m^2$ ; la ecuación presenta la menor desviación para el rango de  $0.18 < V < 0.2$ . En otros incineradores diferentes al que se utilizó para hacer el estudio, la ecuación presenta una desviación del +/- 20% lo cual se debe a las probables diferencias en la composición del desecho, el tamaño del horno, la forma de las parrillas, etc. [ 22 ]

Aunque un decremento en el flujo de aire bajo la parrilla reduce las emisiones de partículas del horno, normalmente esto se ve afectado por una disminución en la velocidad de quemado, por lo que se debe hacer un análisis económico entre la capacidad del horno y el costo del equipo de control de la contaminación para optimizar el flujo de aire bajo la parrilla. Por supuesto que existe un requeri-

miento mínimo de aire bajo las parrillas para protegerlas de la corrosión causada por el calor.

c) Tamaño del incinerador

Las unidades de incineración grandes parecen presentar ligeramente mayores razones de emisión de partículas, aunque no se ha establecido cuantitativamente este efecto. Este incremento en las emisiones se puede deber a las altas velocidades de quemado y altas velocidades de aire bajo la parrilla asociados con los grandes incineradores. Sin embargo, la comparación de emisiones en unidades grandes y pequeñas con iguales flujos de aire bajo las parrillas muestran un efecto residual debido al tamaño del horno, lo cual posiblemente es consecuencia de las corrientes de convección naturales que se presentan en los equipos grandes.

d) Velocidad de quemado

Por razones similares a las del punto anterior, se espera que altas velocidades de quemado provoquen altos factores de emisión de partículas. Aún no se dispone de datos que permitan establecer una relación cuantitativa entre los dos parámetros.

e) Tipo de parrillas

El efecto del tipo de parrillas ( ver parte 1.4.1 ) es secundario al efecto del flujo de aire bajo las parrillas y al contenido de cenizas en el desecho, pero se ha visto que en sistemas de alimentación con parrillas reciprocantes las emisiones son significativamente más altas que en otros tipos de parrillas, y eso se debe posiblemente a que son sistemas más grandes que presentan un mayor flujo de alimentación de desecho en el horno.

Otro factor es la variación de aberturas que presentan los diferentes tipos de parrillas, lo cual resulta en las diferentes cantidades de cenizas que pueden cernirse y caer por los huecos de la parrilla. Las menores emisiones se pueden esperar de parrillas de tipo rodante ( de rodillo ) que facilitan el cernido de ce-

nizas a través de ellas.

f) Diseño de la cámara de combustión

De los estudios realizados en el condado de Los Angeles, se concluye que las emisiones en unidades pequeñas se pueden reducir sustancialmente mediante el uso de multicámaras de combustión o alturas de hornos pequeñas. En unidades grandes, la necesidad de una cámara de combustión secundaria depende principalmente de la eficiencia de mezclado obtenido en la primera cámara. [ 2 ]

g) Volatilización de sales metálicas

En los incineradores municipales la mayor parte de las cenizas volátiles son arrastradas desde el lecho de basura o por ruptura de productos de pirólisis ( hollín ). En incineradores pequeños, las emisiones no se pueden explicar sólo por mecanismos de arrastre ya que se ha encontrado que en estos sistemas las partículas se han formado por volatilización y recondensación de sales metálicas, cosa que ocurre a nivel de trazas en incineradores municipales donde la mayoría de los óxidos son arrastrados mecánicamente desde el lecho de basura.

## 2.3 TEMPERATURA DE COMBUSTION

De las variables que afectan la combustión, solo la temperatura puede ser rápidamente controlada durante la operación de un incinerador e independientemente de su diseño. Esto se logra variando la relación aire/combustible. Los límites superiores en el valor de temperatura dependen de las temperaturas de operación soportadas por los materiales refractarios y los límites inferiores de temperatura están definidos por la mínima temperatura a la que se puede llevar a cabo la combustión casi completa de los diferentes tipos de desechos sólidos. Además, la temperatura controla la rapidez con la que se puede llevar a cabo la incineración,

ya que la velocidad a la cual se llevan a cabo muchas reacciones de combustión se incrementa rápidamente por un aumento en la temperatura.

En incineración de desechos municipales se utilizan quemadores de gas o de aceite para mantener la temperatura entre 700 y 1000 °C aunque generalmente el quemador se utiliza únicamente para efectuar la ignición inicial de los materiales de desecho, ya que estos son capaces de mantener estas temperaturas de combustión a menos que se encuentren demasiado húmedos. [ 10 ]

En un sistema de incineración real, la temperatura tiene una gran variación en las diferentes zonas del horno, ya que por ejemplo, la máxima temperatura se encuentra en la zona de flama disminuyendo en las paredes de la cámara de combustión y hacia la salida de la cámara de combustión. Generalmente, para efectos de cálculos de combustión y medición de la temperatura del horno, esta se toma como la temperatura promedio de los gases de combustión a la salida. Una de las maneras de controlar la temperatura de combustión consiste en regular el exceso de aire alimentado a la cámara de combustión. Conforme aumentamos el exceso de aire, éste actúa como un diluyente en el sistema de combustión absorbiendo calor y reduciendo consecuentemente la temperatura en el incinerador. Normalmente es deseable reducir la temperatura para disminuir la degradación del aislamiento refractario. Por el contrario, cuando se quema un desperdicio con bajo poder calorífico, deberán disminuirse los niveles de exceso de aire para ayudar a incrementar la temperatura del incinerador.

En la práctica, generalmente es deseable minimizar el exceso de aire, asegurándose una adecuada combustión y eficiencia de destrucción, con el fin de minimizar los requerimientos de manejo de gases de equipo corriente abajo, disminuyendo así el tamaño del ventilador de tiro inducido y la potencia requerida. La temperatura también se controla instalando sistemas de recuperación de calor dentro de la cámara de combustión, o bien, inyectando agua directamente en la cámara de combus-

tión cuando se tienen desechos con alto poder calorífico y se desea que el calentamiento no sea excesivo como para dañar los materiales de construcción. El agua puede ser adicionada previamente al desecho o espreada dentro de la cámara de combustión evitando apagar la flama. Como veremos posteriormente, la temperatura guarda un estrecha relación con otra variable en la incineración, la cual es el tiempo de residencia. A mayor temperatura, se incrementan los costos por los materiales utilizados, pero disminuye el tiempo de residencia disminuyendo el costo de operación.

#### 2.4 TIEMPO DE RESIDENCIA

Una variable importante para la obtención de una buena combustión es el tiempo de residencia. Se debe de proporcionar el suficiente tiempo al proceso de incineración para que el material de desperdicio sea completamente quemado y no salga crudo por el ducto de gases de escape o por el de residuos incombustibles.

El tiempo de residencia requerido depende de la temperatura, el tamaño de partícula del combustible de desecho y el grado de turbulencia alcanzado dentro de la cámara de combustión.

Para conocer el tiempo de la combustión, se necesita recurrir a datos experimentales o hacer pruebas de laboratorio individuales cuando se presentan desechos especiales. En general, un inadecuado tiempo de residencia es aquel que produce durante la combustión, partículas de carbón, monóxido de carbono y gases orgánicos crudos.

En la práctica, para desechos municipales, el tiempo de residencia varía de 0.25 a 1.5 horas dependiendo principalmente del tipo de desecho, tipo de quemador

de combustible auxiliar y diseño del incinerador. [ 1 ]

## 2.5 TURBULENCIA EN LA ZONA DE COMBUSTION

El grado de turbulencia de el aire para la combustión ( oxidación ) con los desperdicios combustibles, afecta la operación del incinerador en forma muy significativa. Se usan medios mecánicos o aerodinámicos para incrementar la turbulencia. Tanto la eficiencia de combustión como el tiempo requerido para completarla se ven significativamente afectados por el tamaño y la turbulencia de la flama. No hay un parámetro aceptado que defina precisamente la cantidad de turbulencia, por lo tanto, esta es juzgada por los resultados producidos en la combustión. La turbulencia puede ser inducida mecánicamente mediante el uso de:

- Rejillas móviles o fijas
- Parrillas mecánicas
- Horno rotatorio
- Atizadores mecánicos
- Atizadores manuales

La turbulencia mecánica tiene como principal objetivo el de remover y cernir las cenizas para "exponer" al desecho combustible no quemado a la atmosfera oxidante de la cámara de combustión. En incineradores de desechos sólidos, el grado de agitación es función de la velocidad de las parrillas y los movimientos de agitación de las mismas, o bien, en el caso de hornos rotatorios, de la velocidad de rotación del horno y las placas agitadoras en su interior.

La turbulencia aerodinámica se genera en el lecho de basura gracias a la inyección del aire de combustión a altas velocidades, para promover la oxidación de

los materiales de desecho, pero de manera controlada para evitar el arrastre de materiales crudos y cenizas volátiles al exterior del incinerador ( ver parte 2.2 ).

La máxima turbulencia se obtiene con el máximo flujo de aire, y es por esta razón, que muchas veces se obtienen muy buenos resultados en el incinerador cuando está operando a su máxima capacidad.

El mayor grado de turbulencia aerodinámica lo obtenemos en los sistemas de incineración de lecho fluidizado, como se vió en la parte 1.4.2

El grado y tipo de turbulencia deseado dentro del incinerador, es un factor determinante para el diseño de la forma y configuración de la cámara de combustión.



## CAPITULO 3

## METODO RECOMENDADO PARA EL DISEÑO DE INCINERADORES MUNICIPALES

## 3.1 BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA

La incineración es un proceso de incineración que involucra la reacción de los componentes combustibles del desecho con el oxígeno del aire. En este subcapítulo se determinan las ecuaciones existentes para realizar los balances de materia y energía para cuantificar el aire de combustión requerido, el exceso de aire, la cantidad de combustible auxiliar para mantener la ignición de los desechos, así como los flujos y composiciones de los gases de escape en función de la composición analítica elemental de los desechos. Debido a que la naturaleza química real de los desechos es desconocida, los cálculos involucrados en los balances de materia y energía del incinerador se apoyan en las siguientes suposiciones:

- Todo el hidrógeno se convierte en vapor de agua a menos que se especifiquen otras reacciones.
- Todos los cloruros y fluoruros se convierten en los respectivos halogenuros de hidrógeno, HCl y HF.
- Todo el carbono se convierte en dióxido de carbono,  $CO_2$ .
- Todo el azufre se convierte en dióxido de azufre,  $SO_2$ .
- Los metales alcalinos se convierten en hidróxidos: Ej. el Sodio a hidróxido de sodio.
- Los metales no alcalinos se convierten en óxidos: Ej. Cobre a óxido de cobre, Hierro a óxido de hierro.
- Todo el nitrógeno proveniente del desecho combustible o del aire toma la forma de molécula diatómica,  $N_2$ .

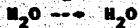
### Balance de Materia

Para iniciar los cálculos del balance de materia es necesario conocer la composición elemental promedio del desecho que se pretende incinerar, y esta información proviene del análisis elemental de las diversas fracciones de las que esta compuesta la basura (ver parte 2.1). Esta composición se puede expresar como un porcentaje o fracción peso de cada uno de los elementos constituyentes del desecho global. Así pues, se debe definir la composición elemental, el contenido de humedad y de material inerte, expresando además la fracción de carbono C, de hidrógeno H, de oxígeno O, nitrógeno N, cloro Cl, fluor F, azufre S, fósforo P, e inertes en Kg por Kg de desecho. También se debe definir la capacidad de alimentación del incinerador en Kg de desecho por hora para poder calcular los requerimientos de aire de combustión y poder predecir el flujo y la composición de los gases de combustión en el escape.

En sistemas de incineración de basura, el porcentaje de aire en exceso se fija en un valor entre el 100 y 200% del aire estequiométrico requerido [ 6 ], este valor se puede definir también en base a la temperatura requerida dentro de la cámara de combustión de acuerdo al balance de energía o a la turbulencia deseada en el lecho de basura.

#### Balances estequiométricos:

Las siguientes reacciones y balances estequiométricos están basados en las su posiciones indicadas anteriormente:



En la tabla 3.1 se muestra el requerimiento de  $O_2$  y el rendimiento de productos de combustión para cada una de las reacciones consideradas para los elementos

Componentes del desecho.

Tabla 3.1 Requerimiento de oxígeno estequiométrico y rendimiento de productos de combustión.

Componente elemental del desecho	Requerimiento de O <sub>2</sub> estequiométrico	Productos de combustión
C	2.67 Kg/Kg C	* 3.67 Kg CO <sub>2</sub> /Kg C
H <sub>2</sub>	8.0 Kg/Kg H <sub>2</sub>	9.0 Kg H <sub>2</sub> O/Kg H <sub>2</sub>
O <sub>2</sub>	(-) 1.0 Kg/Kg O <sub>2</sub>	---
N <sub>2</sub>	---	1 Kg N <sub>2</sub> /Kg N <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> O	---	1 Kg H <sub>2</sub> O/Kg H <sub>2</sub> O
Cl <sub>2</sub>	(-)0.231 Kg/Kg Cl <sub>2</sub>	1.03 Kg HCl/Kg Cl <sub>2</sub>
F <sub>2</sub>	(-)0.42 Kg/Kg F <sub>2</sub>	1.05 Kg HF/Kg F <sub>2</sub>
S	1.0 Kg/Kg S	2.0 Kg SO <sub>2</sub> /Kg S
N <sub>2</sub> del aire	---	3.31 Kg N <sub>2</sub> /Kg(O <sub>2</sub> ) esteq.

Requerimiento de aire esteq. = 4.31 x Kg (O<sub>2</sub>) esteq. = Kg de aire esteq.

El balance de materia hecho con los datos de esta tabla debe considerar que las reacciones de formación de los halogenuros de hidrógeno consumen 0.25 y 0.47 Kg. de agua por Kg. de halógeno para formar HCl y HF respectivamente. Debido a esto, cuando el desecho no tiene la suficiente humedad para apoyar estas dos reacciones, lo que se hace es inyectar vapor de agua o combustible auxiliar de manera que proporcione al menos 1 Kg H<sub>2</sub>/35.5Kg Cl<sub>2</sub> y 1 Kg H<sub>2</sub>/19Kg F<sub>2</sub> presentes en el desecho. Además, se considera que el oxígeno presente en el desecho reacciona con el hidrógeno del mismo para formar agua, de ahí el signo negativo presente en la tabla para el C<sub>2</sub>, ya que esta forma parte del oxígeno requerido en la combustión del H<sub>2</sub>.

Para complementar el balance de materia con los datos del combustible auxiliar, se necesita conocer la composición y estequiometría del mismo. En la tabla 3.2 se presentan los requerimientos de oxígeno estequiométrico y los productos de combustión para los tres tipos de combustible más utilizados en operaciones de incineración.

\* NOTA: Los coeficientes fueron obtenidos de la estequiometría de las diferentes reacciones involucradas

En la tabla 3.3 se presentan los datos de la composición elemental del combustible que junto con la composición del desecho nos lleva a la composición combinada de la alimentación del incinerador, (desecho-combustible auxiliar). [ 1 ]

Tabla 3.2 Estequiometria de la combustión de combustibles auxiliares

Combustible	(O <sub>2</sub> )est. (f) Kg/Kg de comb.	Rendimiento de productos de combustión. Kg/ Kg de combustible.		
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
Combustible residual	3.16	3.18	0.92	10.5
Combustible destilado	3.32	3.20	1.11	11.0
Gas natural	3.67	2.54	2.04	12.2

Tabla 3.3 Composición elemental del combustible auxiliar

Kg Componente / Kg combustible

Componente	Combustible residual	Combustible destilado	Gas natural
C <sub>f</sub>	0.866	0.872	0.693
H <sub>f</sub>	0.102	0.123	0.227
N <sub>f</sub>	-	-	0.08
S <sub>f</sub>	0.03	0.005	-

Generalmente, el flujo de combustible auxiliar utilizado, así como el % de exceso de aire de combustión se fijan en base a un estudio técnico económico en el cual se considera que se debe mantener una cierta temperatura de combustión así como un flujo de aire de combustión alto para proveer de turbulencia al lecho de basura que se está incinerando. A mayor exceso de aire se mejora la combustión pero

se diluye la cantidad de calor en el sistema, por lo que hay que utilizar la flama de un combustible auxiliar para mantener la temperatura, y a menor exceso de aire se requiere de menos combustible de apoyo pero disminuye la eficiencia de la combustión.

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para realizar el balance de materia, para calcular el requerimiento de aire de combustión estequiométrico y total así como la composición y flujo de los gases de combustión: [ 19 ]

Nota: ( Ver el apéndice para la significación de la nomenclatura utilizada )

El cociente entre el gasto de combustible auxiliar y el flujo de alimentación del desecho nos da el combustible auxiliar requerido por Kg de desecho:

$$n_f = n_{fk} = n_f / F \quad \text{Kg comb/ Kg desecho} \quad . . . . . 3.1$$

Composición elemental de la alimentación combinada de desecho y combustible auxiliar al horno de incineración :

$$C_k = \frac{C + n_f C_f}{1 + n_f} \quad \text{Kg C/ Kg alim.} \quad . . . . . 3.2$$

\* ver nota

$$H_k = \frac{H + n_f H_f}{1 + n_f} \quad \text{Kg H/ Kg alim} \quad . . . . . 3.3$$

$$H_2O_k = \frac{H_2O}{1 + n_f} \quad \text{Kg H}_2\text{O/ Kg alim} \quad . . . . . 3.4$$

$$N_k = \frac{N + n_f N_f}{1 + n_f} \quad \text{Kg N/ Kg alim} \quad . . . . . 3.5$$

$$O_k = \frac{O_2}{1 + n_f} \quad \text{Kg O}_2/\text{ Kg alim} \quad . . . . . 3.6$$

$$Cl_k = \frac{Cl_2}{1 + n_f} \quad \text{Kg Cl}_2/\text{ Kg alim} \quad . . . . . 3.7$$

$$F_k = \frac{F_2}{1 + n_f} \quad \text{Kg F}_2/\text{ Kg alim} \quad . . . . . 3.8$$

$$S_k = \frac{S + n_f S_f}{1 + n_f} \quad \text{Kg S/ Kg alim} \quad . . . . . 3.9$$

Las siguientes ecuaciones nos proporcionan el cálculo del requerimiento de oxígeno de combustión basado en las reacciones anteriormente descritas.

\* NOTA: El número 1 indicado en el denominador tiene unidades de Kg desecho/ Kg desecho para fines del análisis dimensional.

$$C_k \times 2.67 \text{ Kg O}_2/\text{Kg C} = \text{Kg O}_2/\text{Kg alim}$$

$$(H_k - Cl_k/35.5 - F_k/19) \times 8.0 \text{ Kg O}_2/\text{Kg H} = \text{Kg O}_2/\text{Kg alim}$$

$$S_k \times 1.0 \text{ Kg O}_2/\text{Kg S} = \text{Kg O}_2/\text{Kg alim}$$

$$- O_k \text{ ( en la alimentación )} = - \text{Kg O}_2/\text{Kg alim}$$

---


$$\text{SUMA} = (O_2) \text{ esteq. (k)} = \text{Kg O}_2/\text{Kg alim} \quad \dots \quad 3.10$$

Si tomamos a  $n_f = 0$  en las ecuaciones anteriores, obtenemos el valor de  $(O_2) \text{ esteq. (w)}$ , es decir, el requerimiento de oxígeno estequiométrico para la combustión del desecho sin considerar al combustible auxiliar.

A continuación se presenta el cálculo de flujos máxicos de gases de combustión basados en la estequiometría de las reacciones involucradas:

$$\begin{aligned} CO_{2k} &= C_k \times 3.67 && \text{Kg CO}_2/\text{Kg alim} \quad \dots 3.11 \\ H_2O_{kp} &= (H_k - Cl_k/35.5 - F_k/19) \times 9.0 + H_2O_k && \text{Kg H}_2\text{O}/\text{Kg alim} \quad \dots 3.12 \\ N_{2k} &= ((O_2) \text{ esteq. (k)} \times 3.31) + N_k && \text{Kg N}_2/\text{Kg alim} \quad \dots 3.13 \\ HCl_k &= Cl_k \times 1.03 && \text{Kg HCl}/\text{Kg alim} \quad \dots 3.14 \\ HF_k &= F_k \times 1.05 && \text{Kg HF}/\text{Kg alim} \quad \dots 3.15 \\ SO_{2k} &= S_k \times 2.0 && \text{Kg SO}_2/\text{Kg alim} \quad \dots 3.16 \end{aligned}$$

La suma de las cantidades anteriores nos da los kilogramos de productos gaseosos de combustión por kilogramo alimentado de desecho-combustible.

$$CP_k = CO_{2k} + H_2O_{kp} + N_{2k} + HCl_k + HF_k + SO_{2k} \quad \text{Kg gas} / \text{Kg alim} \quad \dots 3.17$$

A partir de la determinación del porcentaje de aire en exceso, EA, se puede calcular el  $O_2$  y  $N_2$  adicionales presentes en los gases de combustión:

$$(O_2)_{EA} = EA/100 \times (O_2) \text{ esteq. (k)} \quad \text{Kg O}_2/\text{Kg alim} \quad \dots 3.18$$

$$(N_2)_{EA} = 3.31 \times (O_2)_{EA} \quad \text{Kg N}_2/\text{Kg alim} \quad \dots 3.19$$

Cálculo del flujo total de gases de combustión:

$$CG = CP_k + (O_2)_{EA} + (N_2)_{EA} \quad \text{Kg totales de gas}/\text{Kg alim} \quad \dots 3.20$$

Con las siguientes ecuaciones se puede calcular la fracción masa de cada componente de los gases de combustión:

$FCO_2 = CO_{2k} / CG$	Kg $CO_2$ / Kg gas . . . . .	3.21
$FH_2O = H_2O_{kp} / CG$	Kg $H_2O$ / Kg gas . . . . .	3.22
$FN_2 = (N_{2k} + (N_2)_{EA}) / CG$	Kg $N_2$ / Kg gas . . . . .	3.23
$FO_2 = (O_2)_{EA} / CG$	Kg $O_2$ / Kg gas . . . . .	3.24
$FHCl = HCl_k / CG$	Kg $HCl$ / Kg gas . . . . .	3.25
$FHF = HF_k / CG$	Kg $HF$ / Kg gas . . . . .	3.26
$FSC_2 = SC_{2k} / CG$	Kg $SO_2$ / Kg gas . . . . .	3.27

Los componentes que constituyen menos del 1 a 2% de los gases de combustión se pueden descartar para los cálculos posteriores del balance de materia y energía. En la mayoría de los casos, el  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$  y  $O_2$  son los únicos gases que se necesitan considerar en el diseño de los sistemas de manejo de gases tales como ventiladores y ductos.

En seguida se presenta el cálculo del flujo volumétrico de los principales productos de combustión por Kg alimentado y referidos a condiciones estándar a  $T = 20^\circ C$  y  $P = 1$  atm. ( mcs = metros cúbicos estándar ) [ 19 ]

$VCO_2 = FCO_2 \times CG / 1.82$	mcs / Kg alim . . . . .	3.28
$VH_2O = FH_2O \times CG / 0.748$	mcs / Kg alim . . . . .	3.29
$VN_2 = FN_2 \times CG / 1.165$	mcs / Kg alim . . . . .	3.30
$VO_2 = FO_2 \times CG / 1.33$	mcs / Kg alim . . . . .	3.31
$V(\text{otros}) = F(\text{otros}) \times CG / 0.0414 M$	mcs / Kg alim . . . . .	3.32

Donde M es el peso molecular del gas, y además el número de  $m^3$  producidos por Kg alimentado viene dado por:

$$q = VCO_2 + VH_2O + VN_2 + VO_2 \quad m^3 \text{ std / Kg alim} \quad . . . . . 3.33$$

Y el flujo volumétrico de gas por unidad de tiempo se calcula con:

$$\text{mcs / min} = q \times F \times (1 + n_g) / 60 \quad m^3 \text{ std / minuto} \quad . . . . . 3.34$$

\* NOTA: Los coeficientes en el denominador de la ecuación 3.28 - 3.32 indican la densidad del gas en M.K.S.

### Balace de Energía

El balance de energía nos conduce a la determinación de la cantidad de combustible auxiliar que se debe alimentar junto con un porcentaje de aire en exceso que se introduce de acuerdo a la temperatura de operación previamente fijada.

Para iniciar los cálculos se debe conocer el valor del poder calorífico superior que se encuentra reportado para el desecho, para obtener el poder calorífico neto, en el cual se ha descontado el calor necesario para evaporar el agua contenida en el desecho y la formada en las reacciones de combustión del hidrógeno:

$$\text{NHV} = \text{HHV} - 583.3(\text{H}_2\text{O} - 9(\text{H} - \text{Cl}_2/35.5 - \text{F}_2/19)) \quad \text{Kcal/ Kg de desecho} \quad . \quad 3.35$$

Para evitarnos complicaciones en los cálculos, los valores de Cp utilizados para los diferentes componentes se tomarán como valores medios, sin que esto ocasione desviaciones considerables [ 1 ]. En la tabla 3.4 se presentan los valores de Cp que se utilizarán y para evitar los cálculos rigurosos de transferencia de calor se asumirá que las pérdidas de calor son el 5% del total del calor liberado en la cámara de combustión. [ 17 ]

Tabla 3.4 Calores específicos

Componente gaseoso	Cp Kcal/ Kg °C
Aire en exceso	0.26
N <sub>2</sub>	0.26
CO <sub>2</sub>	0.25
H <sub>2</sub> O	0.49
HCl	0.20
SO <sub>2</sub>	0.18

En la tabla 3.5 se presentan los valores de poder calorífico neto de los combustibles auxiliares utilizados comunmente. [ 17 ]



Tabla 3.5 Poder calorífico de combustibles auxiliares

Combustible auxiliar	Poder calorífico neto, KJF
Combustóleo residual	9700 Kcal / Kg
Combustóleo destilado	10200 Kcal / Kg
Gas natural	11000 Kcal / Kg

Para iniciar el balance de energía y poder obtener el requerimiento de combustible auxiliar, se debe fijar la temperatura de operación dentro del horno, así como la temperatura del aire de combustión precalentado por los gases de combustión de acuerdo a las posibilidades térmicas de los materiales del precalentador, hervidores y sistema de ductería del aire de combustión; En seguida se presentan los conceptos involucrados en el balance de energía y la ecuación que lo representa, asumiendo que la temperatura ambiental es de 25 °C.

#### Balance de energía:

$$\text{Poder calorífico del desecho} + \text{Poder calorífico del comb. auxiliar} + \text{Entalpía del aire de comb. de comb. tión precalentado} = \text{Entalpía de los gases de combustión (decomb. y combustible auxiliar)} + \text{Pérdidas de calor de calor}$$

La siguiente ecuación presenta el balance de energía en Kcal por Kg alimentado de desecho y combustible auxiliar combinado. (Breve explicación de la ecuación en el apéndice A-3 pag 147)

$$\left( \frac{n_{HV}}{1+n_f} + \frac{n_f n_{HV}}{1+n_f} \right) 0.95 + 1.12(O_2)_{\text{esteq}(k)} (T_{\text{air}} - 25) \left( 1 + \frac{EA}{100} \right) = 0.26(CO_{2k} + N_{2k}) + 0.49n_{O_2} + 1.12(O_2)_{\text{esteq}(k)} \frac{EA}{100} (T - 25) \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg alim}} = 3.35$$

La siguiente ecuación nos da el gasto requerido de combustible auxiliar para un valor de  $r_f$  propuesto:

$$n_f = n_f \times F \quad \text{kg comb. aux./ hora} \quad . . . . . 3.37$$

La siguiente ecuación da la capacidad del combustible auxiliar alimentado en Kcal / hora:

$$Q_f = m_f \times HHV \quad \text{Kcal / hora} \quad . . . . . 3.38$$

El gasto total de materiales ( combustible auxiliar-desecho ) que se introduce en el horno viene dado por:

$$FT = m_f + F \quad \text{Kg alimentados/ hora} \quad . . . 3.39$$

La ecuación 3.36 es de gran utilidad, ya que para los valores recomendados de aire en exceso, temperatura y temperatura del aire precalentado, se puede obtener  $m_f$  y posteriormente la capacidad requerida de combustible auxiliar a quemarse junto con los desechos. Cabe mencionar que conforme se aumenta el valor del aire en exceso propuesto, EA, la cantidad de combustible auxiliar aumenta para una temperatura de operación constante.

### 3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE COMBUSTION

Las ecuaciones que hasta el momento se han desarrollado para correlacionar los diversos parámetros que intervienen en el dimensionamiento de la cámara de combustión de incineradores, ha surgido del análisis de datos experimentales realizados en la operación de varios incineradores municipales en los E.U.. Estas correlaciones proporcionan una aproximación relativamente confiable para el dimensionamiento de la cámara de combustión tanto para hornos de tipo rotatorio como para cámaras de combustión rectangulares con sistemas de parrillas mecánicas.

Los parámetros que intervienen en los procesos de incineración y que se utilizan para llegar al diseño aproximado de la configuración de la cámara de combustión del incinerador se describen a continuación:

#### a) Capacidad del incinerador, F

Se defina capacidad del incinerador a la velocidad total de quemado que puede

proporcionar el incinerador, la cual determina directamente la cantidad o flujo de desecho que se puede alimentar en el horno, y está dado en Kg desecho/ hora.

b) Velocidad de quemado por unidad de área,  $F_a$

También conocida como velocidad de quemado superficial, es un concepto similar al anterior, pero que define la velocidad de quemado de desecho que se puede incinerar sobre una unidad de área del sistema de parrillas, está dado en Kg de desecho/ hr  $m^2$ .

c) Intensidad de combustión,  $I$

Es la velocidad de liberación de calor por unidad de volumen durante el proceso de combustión, expresado en Kcal/ hr  $m^3$  de volumen interno del horno en el cual tiene lugar la combustión, y está basado en el poder calorífico superior del desecho.

R. H. Essenhigh comenzó el desarrollo de los modelos fisicomatemáticos en 1968 al correlacionar la capacidad del incinerador con la máxima velocidad de quemado superficial medida experimentalmente, llegando a una ecuación del tipo logarítmico: [ 12 ]

$$F_a = 4.88243 K_1 \text{ Log}(2.2046 F) \quad \text{Kg/ hr } m^2 \quad \dots \quad 3.40$$

En donde  $K_1$  es el factor logarítmico que varía con los diferentes tipos de desecho según la clasificación del I.I.A. ( ver capítulo 2 ).

Para llegar a la ecuación de velocidad de quemado que relacione las variables:  $I$  Kcal/hr  $m^3$ ,  $F$  Kg/hr y  $F_a$  Kg/hr  $m^2$ , suponemos que la cámara de combustión del incinerador se puede representar como su equivalente a una caja rectangular de altura  $H$ , ancho  $W$  y largo  $L$ , y si representamos a  $W$  y  $L$  como múltiplos de la altura:

$$W = aH \quad \dots \quad 3.41a$$

$$L = bH \quad \dots \quad 3.41b$$

Entonces el área de la base que además representa al área de las parrillas mecánicas sobre la cual se lleva a cabo la combustión se puede expresar como:

$$A = WL = (ab) H^2 \quad \text{m}^2 \quad \dots \quad 3.42$$

y el volumen de la cámara de combustión como:

$$Vc = HWL = (ab) H^3 \quad \text{m}^3 \quad \dots \quad 3.43$$

Como por definición la intensidad de combustión es el calor liberado por unidad de tiempo y volumen, ésta se puede calcular al multiplicar el flujo de desecho por su poder calorífico dividido entre el volumen de la cámara de combustión:

$$I = F B / Vc \quad \text{Kcal/hr m}^3 \quad \dots \quad 3.44$$

donde B es el poder calorífico superior del desecho, B = HHV. Si despejamos F y sustituimos Vc de la ecuación 3.43:

$$F = \frac{I}{B} (ab) H^3 \quad \text{Kg/hr} \quad \dots \quad 3.45$$

En las condiciones óptimas de máximas velocidad de quemado por unidad de superficie:

$$F_a = F / A \quad \text{Kg / hr m}^2 \quad \dots \quad 3.46$$

Sustituyendo en la última ecuación, F de la ecuación 3.45 y A de la ecuación 3.42, queda como:

$$F_a = \frac{I}{B} H \quad \text{Kg / hr m}^2 \quad \dots \quad 3.47$$

Sustituyendo además H de la ecuación 3.45 en la ecuación 3.47 queda:

$$F_a = (I/B)^{2/3} (ab)^{-1/3} F^{1/3} \quad \text{Kg / hr m}^2 \quad \dots \quad 3.48$$

Que podemos escribir en forma mas conveniente como:

$$F_a = K F^{1/3} \quad \text{Kg / hr m}^2 \quad \dots \quad 3.49$$

En esta última ecuación, el término  $K = (I/B)^{2/3} (ab)^{-1/3}$  se le conoce como "Factor de desecho Essenhigh" cuyo valor depende del valor calorífico del desecho, también de la intensidad de combustión que se puede obtener para un tipo de desecho determinado y la configuración del incinerador. Si consideramos un nuevo parámetro  $R = K_1 / K$ , al igualar las ecuaciones 3.40 y 3.49 obtenemos:

$$F^{1/3} = 4.88243 R \text{ Log}(2.2046 F) \quad \dots \quad 3.50$$

Se ha establecido que R varía aproximadamente de 0.365 a 0.52 conforme F se eleva de 45 a 450 Kg/hr, pero para fines de simplificación, R se puede valuar como 0.47 +/- 0.047 para el rango de F de 150 a 450 Kg/hr, Como  $Kl = R \cdot K$  podemos escribir:

$$Kl = (I/B)^{2/3} (ab)^{-1/3} R \quad \dots \dots \dots 3.51$$

El término  $(ab)^{-1/3}$  viene a ser el factor de configuración de la cámara de combustión, el cual se puede expresar como:

$$c = (ab)^{-1/3} = 1/(ab)^{1/3} = (WL/H^2)^{-1/3} \quad \dots \dots \dots 3.52$$

Generalmente el factor c varía entre 0.794 y 1.59 considerando el valor de c = 1.59 como el óptimo, implicando que la base del horno es de sección cuadrada y la altura de aproximadamente el doble de sus lados. Así pues, la ecuación 3.51 se convierte en:

$$Kl = c \cdot R \cdot (I/B)^{2/3} \quad \dots \dots \dots 3.53$$

Con las ecuaciones desarrolladas anteriormente se cuenta ya con una buena base para llegar al dimensionamiento de la cámara de combustión, obteniéndose principalmente una manera de aproximar el volumen de la cámara de combustión que se necesita para un tipo determinado de desecho y una capacidad de alimentación requerida. En dichas ecuaciones, el valor Kl es empírico y se ha evaluado para varios tipos de desecho con cantidades variables de cenizas incombustibles y contenidos de humedad. Si se supone constante el contenido de cenizas, podemos expresar la variación de Kl como una función del poder calorífico superior del desecho,  $B = \text{Kcal/Kg}$ , el cual varía principalmente con el contenido de humedad libre del desecho. Los valores de HHV ó B (poder calorífico superior) están dados para varios tipos de desecho y ajustados para un contenido de ceniza del 5% según los patrones del IIA. ( ver tabla 2.4 en el cap. 2.1 )

En la figura 3.1 se presenta la gráfica de la curva  $Kl = n (B)^{1/2}$  y también  $Kl = b + mB$ . Para la primera ecuación n es una constante empírica desarrollada

por el IIA y se aproxima bastante a los valores de KI obtenidos por R. H. Essenhigh y es válida para desechos con HHV menores a 1400 Kcal/Kg. Para desechos con HHV mayores o iguales a 1400 Kcal/ Kg aplicable principalmente para desecho de tipo municipal, se estableció una ecuación del tipo lineal  $KI = mB + b$  de donde se conocen m y b a partir de datos analizados por IIA, [ 14 ] . Estos factores se establecieron para hornos con alimentación manual y parrillas estacionarias, sin embargo la ecuación 3.49 permite su aplicación para hornos de alta capacidad y de alimentación mecánica.

A continuación establecemos las ecuaciones necesarias para llegar a la intensidad de combustión óptima, lo cual nos permite calcular aproximadamente el volumen que requiere la cámara de combustión.

$$KI = 0.209260 ( B )^{1/2} \quad \dots \dots \dots 3.54$$

donde B = HHV estén Kcal/Kg y es válida para  $HHV < 1400$  Kcal/Kg.

$$KI = 0.001968 B + 5.207 \quad \dots \dots \dots 3.55$$

la cual es válida para  $HHV \geq 1400$  Kcal/Kg .

Despejando la intensidad de combustión I de la ecuación 3.53, queda como:

$$I = (KI / R c )^{3/2} B \quad \text{Kcal / hr m}^3 \quad \dots \dots \dots 3.56$$

La comparación entre las ecuaciones 3.40 y 3.49 indica que al utilizar la ec. de Essenhigh (3.49), se obtiene un incremento mas rápido en la velocidad de quemado superficial al aumentar la capacidad del incinerador, ya que se utiliza para incineradoras de alimentación mecánica de operación continua donde el proceso de combustión es mejor. [ 33 ]

El área de las parrillas dentro de la cámara de combustión sobre las cuales se lleva a cabo la incineración se calcula mediante las siguientes ecuaciones, las cuales son equivalentes:

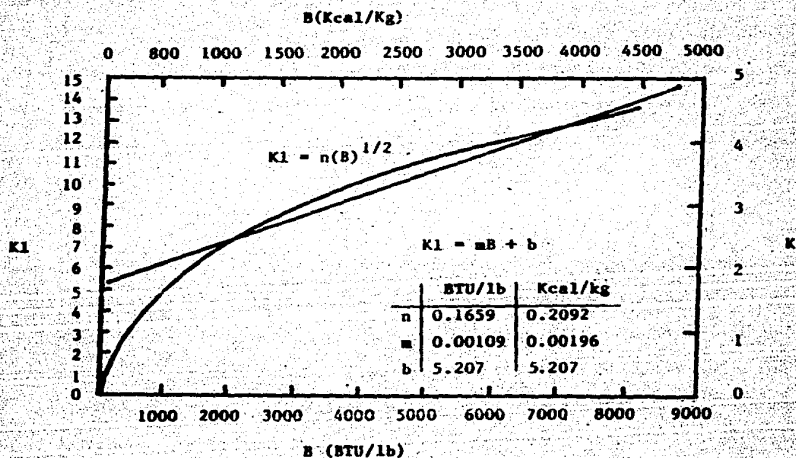


Figura 3.1 Valores de los factores de desecho  $K$  y  $KI$

$$A = F / Fa \quad \text{m}^2 \quad . . . . . 3.57$$

$$A = F / K F^{1/3} \quad \text{m}^2 \quad . . . . . 3.58$$

$$A = F^{2/3} / K \quad \text{m}^2 \quad . . . . . 3.59$$

Finalmente el volumen de la cámara de combustión se calcula con:

$$Vc = \frac{B \cdot F}{I} \quad \text{m}^3 \quad . . . . . 3.60$$

### 3.3 DISEÑO DEL HORNO CON PARRILLAS MOVILES

A partir del cálculo del volumen de incineración que se requiere sobre las parrillas dentro de la cámara de combustión, se pueden obtener las proporciones óptimas que debe presentar el horno. En realidad, este diseño no se realiza de una manera rigurosa ya que depende en parte del criterio y el gusto del incinerador. Sin embargo, existen ciertas consideraciones sobre las cuales se puede llegar a las dimensiones óptimas del horno, dentro de las cuales cabe destacar: 1) La longitud de la flama producida por el quemador dentro del incinerador, 2) La profundidad del lecho de basura sobre las parrillas mecánicas, 3) El espacio de combustión que se necesita sobre el lecho de basura, 4) El tiempo de residencia del desecho, 5) Los patrones de flujo y la turbulencia creada por el aire de combustión dentro del incinerador.

Para comenzar, la longitud del horno debe ser tal que la flama del quemador no alcance al extremo de alimentación del horno ya que la flama debe penetrar casi tangencialmente sobre el lecho de basura y a contracorriente del flujo de desechos. Generalmente se considera que se tienen 0.30 m de longitud de flama por cada 250000 Kcal/hr generados en el quemador, por lo que la longitud de flama se puede expresar como:



$$L_f = Q_f / 840000 \quad \text{m} \quad \dots \quad 3.61$$

En la mayoría de los diseños de los incineradores municipales, la proporción entre el largo  $L$  y ancho  $W$  del horno, es de aproximadamente 3 a 1, relación que se puede modificar de acuerdo con la longitud de la flama y la velocidad recomendada de las parrillas para la transportación del desecho, como se verá a continuación.

Es importante que la profundidad del lecho de basura sobre las parrillas sea de tal magnitud que no sea muy pequeña como para que se desperdicie la capacidad de transporte de las parrillas y que estas se sobrecalienten por estar mas al descubierto, y que no sea demasiado grande como para aproximarse al techo del horno, con lo cual se puede ahogar la flama y la combustión que se realiza dentro del lecho de basura. En la práctica, las profundidades de lecho de basura transportados dentro del incinerador oscila entre 0.4 y 0.6 m.

Una expresión adecuada para la determinación de la altura en función de la profundidad del lecho de basura es la siguiente: ( 3 )

$$4 P \leq H \leq 9 P \quad \text{m} \quad \dots \quad 3.62$$

A partir de la longitud propuesta del horno y el tiempo de residencia del desecho se puede calcular la velocidad requerida de transporte de las parrillas:

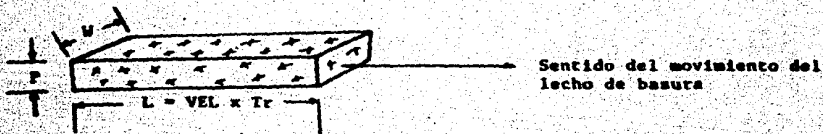
$$VEL = L / T_r \quad \text{m / hr} \quad \dots \quad 3.63$$

Si suponemos válida la consideración de que la velocidad de la parrilla casi es equivalente a la velocidad que lleva el desecho a lo largo de la cámara de combustión, la profundidad del lecho debe tener tal magnitud que la velocidad de la parrilla sea suficiente para cumplir con el gasto o volumen de desecho incinerado por hora. (  $D = Kg / m^3$ , densidad del desecho )

$$F_v = F / D \quad m^3 \text{ desecho / hr} \quad \dots \quad 3.64$$

Si pensamos que el lecho de basura se comporta como una tira continua de

basura que se mueve a una velocidad constante:



Entonces:

$$Fv = \frac{W P L}{Tr} = W P \times (VEL) = \frac{F}{D} \quad \text{m}^3 / \text{hr} \quad \dots \dots \dots 3.65a$$

de ahí:

$$VEL = \frac{F}{D W P} \quad \text{m} / \text{hr} \quad \dots \dots \dots 3.65b$$

Despejando la profundidad del lecho de basura:

$$P = \frac{F}{VEL \cdot D \cdot W} \quad \text{m} \quad \dots \dots \dots 3.65c$$

Con esta ecuación, y la expresión 3.62, obtenemos un valor adecuado de la altura de la cámara de combustión para posteriormente definir el factor de configuración del horno  $c$ , y el volumen de la cámara de combustión. En el Instituto Mexicano del Petróleo se desarrolló un programa de computadora en lenguaje Fortran, el cual, a partir de la capacidad del incinerador que se desea manejar, la composición y propiedades de la basura y las del combustible auxiliar, nos proporciona el volumen de la cámara de combustión, así como la velocidad de las parrillas dentro de un valor mínimo adecuado; posteriormente se pueden definir las proporciones óptimas entre la velocidad de las parrillas, la altura y la longitud del horno buscando el menor costo en la operación.

### 3.4 DISEÑO DEL HORNO ROTATORIO

El volumen de la cámara de combustión del horno rotatorio se puede obtener con las ecuaciones de la parte 3.2 haciendo caso omiso de las ecuaciones que relacionan el área de la parrilla. Podemos utilizar la ecuación 3.60 para obtener lo que sería el volumen interior del cilindro refractario utilizado como incinerador, a partir de la intensidad de combustión y la capacidad del incinerador.

La proporción recomendada entre la longitud y el diámetro del horno rotatorio varían de 2:1 a 10:1 siendo mas utilizada la de 4:1 con lo cual a partir del volumen  $V_c$ :

$$\begin{array}{ll}
 L = 4 (D_i) & m \dots \dots \dots 3.66a \\
 D_i = (V_c/P_i)^{1/3} & m \dots \dots \dots 3.66b \\
 L = 4 (V_c/P_i)^{1/3} & m \dots \dots \dots 3.66c
 \end{array}$$

En el horno rotatorio, las variables que intervienen en el tiempo de residencia del desecho dentro del sistema son: 1) la pendiente que presenta al eje de rotación del horno sobre la horizontal, la cual es normalmente menor al 2 ó 3%. 2) la velocidad de rotación del horno, la cual oscila entre 0.25 a 1.5 rpm, con la cual se mantiene continuamente expuesto el material de desecho al calor y oxígeno presentes en el flujo de gases.

Una aproximación al tiempo de residencia que se puede obtener en un horno rotatorio se calcula mediante la siguiente ecuación: [ 25 ]

$$t = \frac{0.19 L}{\text{rpm } D_i s} \quad \text{minutos} \dots \dots \dots 3.67$$

donde:  $L$  = longitud del horno ( m )  
 $D_i$  = diámetro interior del horno ( m )  
 rpm = rotación, revoluciones por minuto  
 $s$  = pendiente, en m por metros de longitud

Para el diseño, se elige una pendiente y velocidad de rotación tales que propo-

ciones el tiempo de residencia necesario para la combustión completa de la basura.

En el sistema de horno rotatorio, la flama del quemador se coloca en el centro del extremo inferior del horno y se dirige en contracorriente al flujo de desecho. Ver figura 1.6 en el capítulo 1.4.

### 3.5 CRITERIOS DE DISEÑO

Con el método de cálculo, solo podemos obtener de una manera aproximada las dimensiones del horno tales como su volumen o proporciones de altura, ancho y largo, sin embargo es necesario tomar en cuenta las variables que involucra la operación del proceso de incineración; como lo son, la temperatura de combustión, el tiempo de residencia, la turbulencia generada por los gases de combustión, ya que tomándolos en cuenta se puede llegar a determinar y definir con más detalle la configuración del horno y los materiales de construcción con los cuales se va a fabricar.

#### 3.5.1 MATERIALES DE CONSTRUCCION

La corrosividad de la corriente de desperdicios así como la temperatura de operación en la cámara de combustión, determina los materiales de construcción requeridos en el incinerador y en los equipos auxiliares.

Los sistemas de incineración pueden ser fabricados con una amplia variedad de materiales. La selección de los materiales de construcción depende de los siguientes factores: 1) Corrosión 2) Esfuerzo y 3) Temperatura.

Muchos incineradores son fabricados de acero al carbón, recubierto con un apro-

piado refractario de alúmina que soporta la temperatura del proceso de incineración, sin embargo, algunos incineradores son fabricados sin refractario, empleando sólo acero inoxidable para altas temperaturas. La ventaja de esta alternativa es la de eliminar el refractario, el cual necesitaría eventualmiente reemplazamiento.

Materiales de alto costo, tales como el Inconel, Incolóy o Hastelloy, son utilizados solo cuando el desperdicio es corrosivo para otros materiales. [ 18 ].

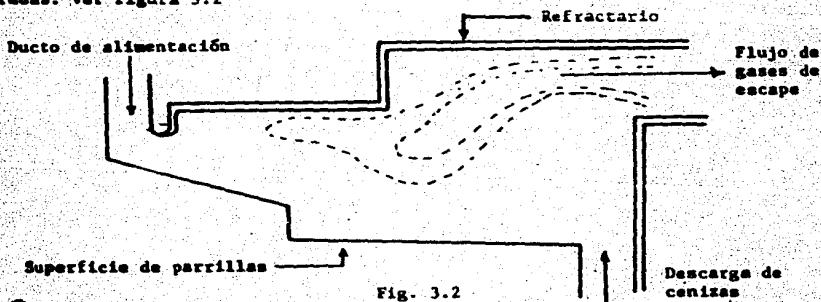
Los refractarios usados en los sistemas de incineración son generalmente del tipo alúmina usándose en ladrillos refractarios estándares o superdurables protegidos por ladrillo aislante. Los concretos refractarios son también ampliamente usados y son similares a aquellos empleados en hornos a altas temperaturas. Los incineradores son equipos que tienen más paros operacionales que los hornos típicos de refinaria, por lo tanto, el aislamiento se sujeta a frecuentes esfuerzos de expansión-contracción, por lo que se recomienda el uso de refractarios de baja expansión térmica como los materiales que contienen del 40 al 42% de alúmina. El calor excesivo dentro de la cámara de combustión, provocado por un inadecuado control de la composición de la alimentación o de la velocidad de alimentación, es probablemente la causa mas frecuente de fallas en el refractario del incinerador.

En incineradores municipales, los refractarios de concreto son normalmente usados para soportar el ataque debido a la abrasión física originada por las partículas sólidas liberadas en la combustión. Los refractarios de concreto son hechos de las mismas arcillas usadas en ladrillos refractarios de aluminosilicatos, sólo que se les añaden agentes aglutinantes que incrementan la resistencia durante la operación. Los concretos refractarios son fácilmente instalados ya que se hace en forma muy semejante al cemento, por ello, también se utilizan para efectuar reparaciones rápidas y para parchar pequeños huecos.

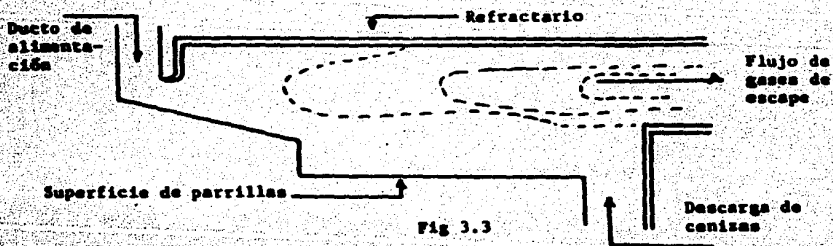
### 3.5.2 CONFIGURACION DE LA CAMARA DE COMBUSTION.

La configuración del horno está definida por la distribución de espacios entre las paredes que forman la cámara de combustión, además tiene gran influencia en los patrones de flujo de gases, la velocidad y el tiempo de residencia de los gases generados en la misma.

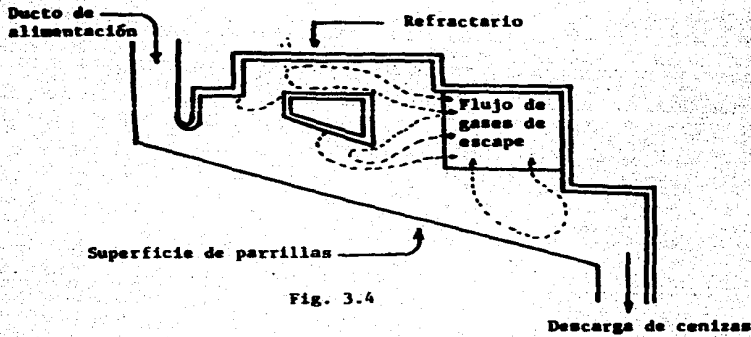
La siguiente configuración de la cámara de combustión provoca elevadas velocidades en los gases de combustión debido al reducido espacio que tiene la garganta de gases del horno, con lo cual se propicia la emisión de humos y partículas sólidas crudas. Ver figura 3.2



La siguiente configuración se basa en la eliminación de la elevación repentina en el techo del horno y el área de descarga se amplía para mejorar la velocidad de salida de los gases. Además este tipo de arreglo reduce sustancialmente el requerimiento de volumen y altura de la cámara de combustión. Ver fig. 3.3



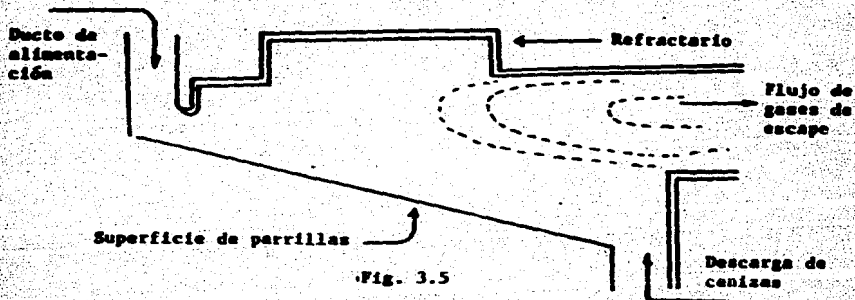
La configuración esquematizada a continuación presenta una salida lateral para los gases de escape y una derivación de los gases en la parte superior de la cámara, lo cual ayuda a promover el asentamiento de las partículas sólidas dentro del mismo horno, además de una mejor distribución de gases de combustión sobre el lecho de basura. Ver figura 3.4



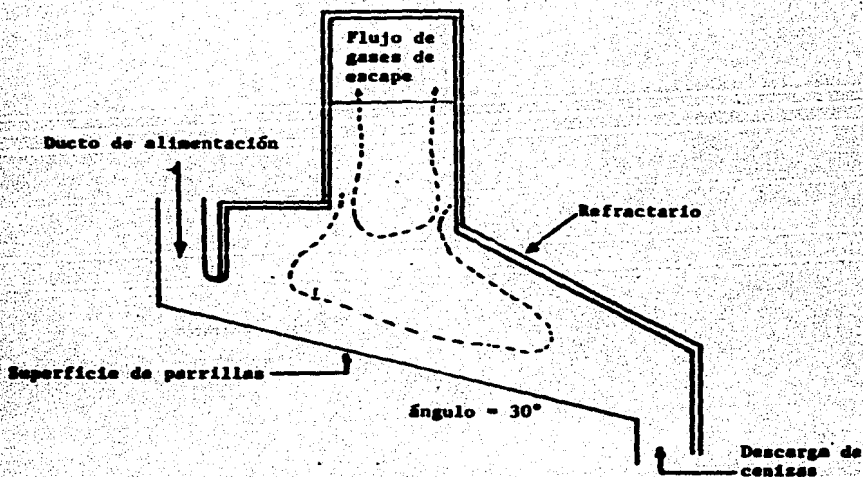
El análisis de estas configuraciones, realizado por W. T. Clark [ 13 ], indica que se pueden obtener velocidades mas bajas y un mejor funcionamiento del incinerador cuando el techo del horno presenta un cierto declive u obstrucción para retener los gases de combustión así como el flujo de aire de combustión alimentado a la cámara.

En el siguiente diseño, el techo del horno presenta una elevación sobre la zona de combustión activa reduciendo la velocidad de la gases y por lo tanto reteniéndolos. Ver figura 3.5

En la figura 3.6 se presenta un diseño muy semejante al del incinerador municipal instalado en Valle de Aragón en la Ciudad de México, en el cual se cuenta con una cámara de combustión secundaria localizada encima del área de combustión activa del horno principal, lo cual proporciona una mayor retención



de los gases dentro del horno, disminuyendo la cantidad de partículas sólidas y materiales combustibles arrastrados al exterior.





## CAPITULO 4

## RECUPERACION DE ENERGIA EN SISTEMAS DE INCINERACION

## 4.1 CONSIDERACIONES GENERALES

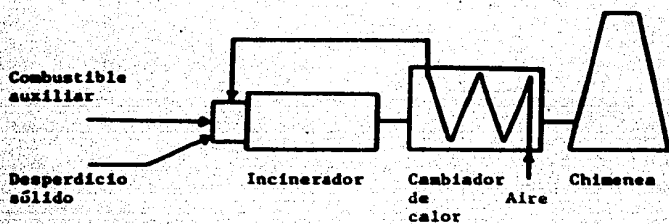
La incineración produce calor, el cual a menudo es recobrado y utilizado en la misma planta de incineración. En general, el desecho es destruido por incineración y la energía es recuperada convirtiendo el poder calorífico del desecho en energía para ahorrar combustible.

Entre las alternativas que se tienen para recuperar calor de la incineración se encuentran las siguientes: 1) Generación de aire precalentado para la combustión. 2) Generación de vapor. 3) Generación de agua caliente. En la figura 4.1 se representa el esquema de las opciones de recuperación de calor más utilizadas.

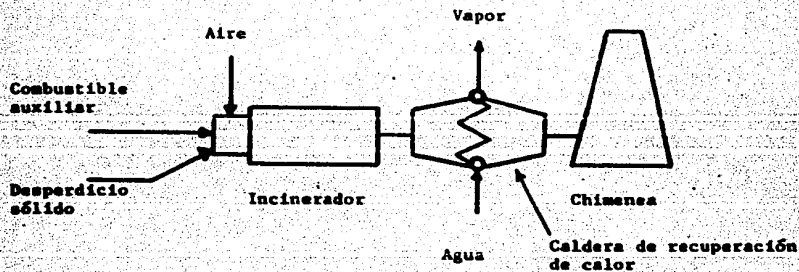
La generación de vapor se utilizó más frecuentemente que las otras dos técnicas de recuperación de calor debido a la versatilidad de su aplicación y a que un kilogramo de vapor contiene significativamente más energía que un kilogramo de agua o aire caliente, y además de que el vapor puede convertirse en agua caliente o puede ser usado para precalentar aire cuando esto sea necesario.

Se debe tomar en cuenta que no todo el calor generado en la combustión de basura puede ser usado, ya que ni el calor requerido para evaporar la humedad en el material, ni el calor requerido para evaporar la humedad formada durante la combustión puede ser recuperado.

Una de las consideraciones que se debe hacer durante la selección o diseño de los sistemas de recuperación de energía es de que la temperatura de los gases a la salida de estos equipos debe ser baja para poder llevar a cabo el lavado y purificación de los gases de escape, pero a la vez debe de ser alta para que a la salida de los equipos de lavado, los gases puedan salir de la chimenea dispersándose apr



A) Pre calentamiento de aire para la combustión



B) Empleo de caldera para recuperación de calor

Figura 4.1 Opciones para recuperar calor

piadamente antes que el enfriamiento cause precipitación o condensación de humedad.

Puesto que el equipo recuperador de calor está sujeto al efecto de los gases de combustión, es importante conocer las propiedades físicas de los gases de combustión, particularmente con respecto a la temperatura, flujo, composición, carga de partículas sólidas y propiedades corrosivas.

La primera limitante para servicios de recuperación de calor es la temperatura de entrada de los gases de combustión, la cual oscila entre 1000 y 1100°C. Con un desperdicio que produzca una gran liberación de calor por tener un alto valor de poder calorífico, se debe asegurar la alimentación de un apropiado exceso de aire para que los gases de combustión en el escape de horno se encuentren dentro de estos límites de temperatura. La estabilidad en los valores de temperatura va asociada a la constancia en el flujo de desechos manejados y a la variación de su poder calorífico. [ 24 ]

Una consideración importante en la definición de la temperatura de salida de los gases en el equipo recuperador de calor es el hecho de que cuando los gases de escape del incinerador se enfrían por debajo de los puntos de rocío del agua, el agua condensada absorbe los gases ácidos de la corriente gaseosa formando ácidos en forma líquida [ 29 ]. Por ejemplo, el dióxido de azufre se absorbe en el agua formando ácido sulfuroso y ácido sulfúrico, el cloruro de hidrógeno forma ácido clorhídrico y se pueden formar también ácidos de las especies gaseosas HBr y HI que generalmente están presentes en los gases de escape de la incineración de desechos tóxicos. Por esta razón se pueden utilizar tubos de acero en las calderas de recuperación de calor aún en la presencia de dichos gases ácidos, siempre y cuando no se alcancen los puntos de rocío donde ocurre la condensación del agua junto con el ácido.

Existen otras formas de recuperación de calor, como lo es el empleo de fluido

térmico, sin embargo, este no es aplicable a la incineración de desechos sólidos municipales, ya que se requiere de una gran estabilidad en la temperatura y flujo de gases de combustión para evitar la degradación térmica y polimerización del fluido térmico, lo cual solo es posible obtener con desperdicios de carácter más homogéneo, como algunos desechos lodosos, líquidos y gaseosos de fuentes industriales.

A continuación se presenta una comparación entre las condiciones de un sistema de incineración cuando éste utiliza un sistema de recuperación de calor así como cuando carece de él.

SISTEMA DE INCINERACION CON RECUPERACION DE CALOR	SISTEMA DE INCINERACION SIN RECUPERACION DE CALOR
- Temperaturas y volúmenes de gas reducidos debido a la absorción de calor	- Altas temperaturas en los gases
- Excesos de aire moderados	- Grandes excesos de aire requeridos para controlar la temperatura del horno
- Tamaño moderado de la cámara de combustión	- Cámara de combustión grande recubierta de refractario para manejar altos flujos de gas
- Requerimiento de ventiladores de tiro inducido para manejar pequeños volúmenes	- Grandes volúmenes de gas que requieren equipo de flujo de gases de mayor capacidad
- Requerimiento de equipo y accesorios para el sistema de vapor: tubos de paredes de agua, tambores de vapor, etc.	- No se requieren equipos para generación de vapor
- La operación del incinerador involucra un control adicional en el sistema de caldera para regular la demanda que se presenta de vapor	- Procedimientos de operación relativamente simples
- Posible corrosión en los tubos de vapor, así como en el ducto de gases de escape	- Posible corrosión en el ducto de gases de escape

continúa

- Operadores especializados para controlar el incinerador y la caldera
- Ahorro de energía en la planta de incineración, así como posible recuperación de la inversión gracias a la generación de vapor.
- Operadores convencionales
- No hay ahorro de energía y no se facilita la recuperación de inversión.

#### 4.2. GENERACION DE VAPOR

La elección de realizar el ahorro de energía utilizando una caldera, presupone que existen cantidades substanciales de calor a recuperar y que se tiene la necesidad real o potencial de utilizar vapor o agua caliente, ya que en caso contrario es preferible instalar un cambiador de calor para precalentar el aire de combustión que se alimenta a la cámara. Esta última alternativa es particularmente útil cuando los desechos manejados tienen un bajo valor de poder calorífico y además tienen una gran cantidad de agua, ya que de esta manera se puede reducir la cantidad necesaria de combustible de apoyo y se puede, además, enfriar los gases de escape que se introduzcan en los equipos lavadores.

Como se dijo anteriormente, la variación en el poder calorífico de los desechos que se incineran produce variaciones en la generación de vapor, tal como se muestra de manera aproximada en la tabla 4.1. [ 3 ]

Estos valores deben ser sopesados contra las implicaciones que involucra la instalación de una caldera de recuperación de calor para tomar la decisión de poner o no un sistema de recuperación de calor.

Tabla 4.1 PRODUCCION DE VAPOR EN FUNCION DE LA CALIDAD DEL DESECHO INCINERADO

	VALOR CALORIFICO: KCal/Kg				
	3600	3300	2700	2200	1600
<b>Desecho:</b>					
% Humedad	15	18	25	32	39
% Incombustibles	14	16	20	24	28
% Combustibles	71	66	55	44	33
<b>Vapor generado</b>					
Ton/Ton desecho	4.3	3.9	3.2	2.3	1.5

Los sistemas de generación de vapor más utilizados son los de tubos de agua, aunque en algunos casos la alimentación de desechos al proceso es tan variable que no siempre se tiene el flujo de gases suficiente, por lo que es necesario utilizar calderas de tubos de humo. La carga de partículas sólidas en la corriente de gases de escape también determina la utilización entre las calderas de tubos de humo o calderas de tubos de agua. La última es capaz de manejar cargas de sólidos mayores a la primera en donde el límite de carga de polvos es de  $0.34 \text{ gr./m}^3$  sin necesidad de equipo automático de limpieza de tubos. Una carga de polvos menor a ésta, generalmente no produce ensuciamiento en las paredes de los tubos, pero en ningún caso la carga debe exceder los  $1.15 \text{ gramos/m}^3$ . [ 27 ]

Respecto a los desechos que contienen sulfatos alcalinos e hidrocarburos cíclicos, se deben mencionar las condiciones de corrosión a bajas y altas temperaturas. Los problemas de corrosión se pueden evitar si la temperatura de los metales se mantiene abajo de los  $480^\circ\text{C}$  y por arriba de los  $230^\circ\text{C}$  a la salida de los equipos de recuperación de calor, donde los problemas por punto de rocío del HCl y  $\text{SO}_2$  se pueden evitar. [ 29 ]

Para seleccionar o diseñar el sistema de generación de vapor se deben tomar en cuenta las consideraciones anteriores para definir la temperatura a la que se va a producir el vapor, así como la temperatura a la que saldrán los gases de con

bucción del sistema.

Si definimos  $t$  como la temperatura del vapor generado,  $t_1$  a la temperatura del gas de escape entrante y  $t_0$  la temperatura del gas de escape a la salida de la caldera, podemos calcular el calor disponible de los gases. Como en cualquier sistema de intercambio de calor, también aquí se tiene que considerar una temperatura de acercamiento, la cual consiste en la diferencia entre las temperaturas del medio que se calienta ( $t$ ) y la de los gases de escape a la salida del sistema ( $t_0$ ), de ahí:

$$t_x = t_0 - t \quad \dots \quad 4.1$$

En la práctica, la temperatura de acercamiento  $t_x$  de una caldera de recuperación de calor es del orden de 50 a 90°C.

#### CALOR DISPONIBLE

El calor disponible o aprovechable de los gases de escape es igual al calor de los gases a la entrada de la caldera menos el contenido calorífico de los gases a la salida. Si definimos a  $Q$  como el calor disponible de la corriente de gases de escape en Kcal/Kg entonces:

$$Q = W (h_1 - h_0) \quad \dots \quad 4.2$$

donde  $W$  es el flujo de gases de escape. Como el gas de escape tiene un componente seco y uno húmedo, consideramos al componente seco con las propiedades ( $W_{dg}$ ,  $h_g$ ) y a la humedad con las propiedades ( $W_m$ ,  $h_m$ ) entonces la ecuación 4.2 se convierte en:

$$Q = W_{dg}(h_{g1} - h_{g0}) + W_m(h_{m1} - h_{m0}) \quad \dots \quad 4.3$$

La temperatura de entrada  $t_1$  corresponde a la temperatura de salida de la cámara de combustión, y la temperatura de salida de la caldera  $t_0$  se define por

la temperatura recomendada de acercamiento  $t_x$  y la temperatura del medio que se está calentando  $t$ , con lo cual evaluamos la entalpía de los gases de salida a las condiciones de  $t_o$ . De esta manera calculamos fácilmente la cantidad de calor disponible para una temperatura y presión de generación de vapor requeridas. Finalmente, conociendo el calor disponible podemos calcular la cantidad de vapor que podemos generar.

En la figura 4.2 se muestra un esquema del diagrama de flujo de un sistema típico de generación de vapor empleando una caldera de recuperación de calor a partir de la cual podemos visualizar el balance de materia para calcular la cantidad de vapor generado. Como se puede observar en el esquema, el agua de reposición se eleva a la temperatura del agua de alimentación mediante una derivación del flujo de vapor de la caldera y por el calor contenido en el condensado de retorno. El condensado proveniente de la carga a la cual se somete el vapor producido en la caldera se regresa al desareador en el cual se eleva la temperatura del agua de alimentación antes de ser inyectada a la caldera y además se libera el  $O_2$  disuelto en el agua. Usualmente se emplean tratamientos adicionales para el agua de alimentación para reducir las incrustaciones y la corrosión en las superficies del calentador, también se utilizan ablandadores para remover la mayor parte de la dureza del agua cruda causada por el magnesio y calcio que contiene. Los agentes químicos típicamente usados para el tratamiento de agua son:

- Sulfito de sodio: es un agente químico que se añade para remover el oxígeno disuelto que no se separó en el desareador. La hidracina es otro agente químico que elimina el oxígeno y se aplica en calderas con operación a altas presiones, mayores a 80 atm. [ 1 ]

- Aminas: En el tratamiento de agua para calderas, las aminas se utilizan para controlar el pH en el sistema. Un exceso de alcalinidad (  $pH > 11$  ) provoca una aceleración en el proceso de incrustación, mientras que un pH bajo (  $pH < 6$  )



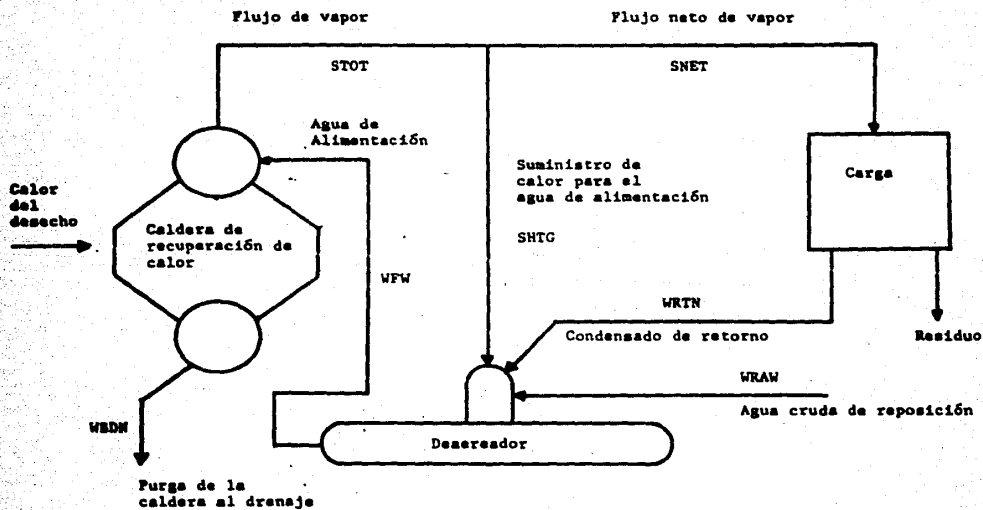


Figura 4.2 Flujo de vapor en una caldera de recuperación de calor

causa una excesiva corrosión en los tubos de la caldera. Con la utilización de aminas, el pH del agua de la caldera se mantiene entre el 8.0 y 9.5 ligeramente alcalino. [ 3 ]

- Fosfatos: se utilizan para precipitar el Calcio y Magnesio remanente de los procesos previos de ablandamiento. Algunos fosfatos actúan como dispersantes previniendo la adhesión del precipitado a las paredes de los tubos.

Como estos agentes químicos tienden a formar lodos que se acumulan en el tanque inferior de la caldera, el agua de la caldera debe purgarse regularmente con vapor para prevenir dicha acumulación. El uso de vapor para hacer la purga representa normalmente del 2 al 11 del vapor generado en la caldera. Nosotros tomaremos el 4% para representar las ecuaciones utilizadas en los balances de materia.

Mediante el uso de las tablas de vapor, y haciendo balances de materia y energía sencillos es posible calcular el vapor generado, el requerimiento de agua de purga, el agua de reposición y el flujo de agua de alimentación. Para poder realizar los cálculos se deben definir los siguientes parámetros: la temperatura de saturación  $t_s$ , la presión del vapor saturado que se desea generar P, la entalpía del vapor y líquido saturado  $h_{g,sat}$ ,  $h_{l,dh}$ , el calor disponible Q ( ec. 4.3 ), la temperatura y entalpía del agua de alimentación  $h_{f,w}$ , el % de vapor que se regresa como condensado al desareador con su temperatura y entalpía  $h_{rtn}$  y finalmente la temperatura y entalpía  $h_{c,r}$  del agua cruda de reposición.

#### Balace de materia y energía en la caldera:

Calor disponible = Q ( de la ecuación 4.3 )

Flujo del vapor de purga = WSDN = 0.04 WFW

Calor del agua de purga = WSDN  $h_{l,dh}$  = 0.04 WFW  $h_{l,dh}$

Calor en el agua de alimentación = WFW  $h_{f,w}$

Calor en el vapor = STOT  $h_{g,stm}$

STOT = WFW - WSDN = 0.96 WFW

\* Para identificar la simbología de las corrientes en el balance de materia y energía, ver dibujo en página 103

Suministro de calor para el agua de alimentación = SHTG  $h_{stm}$

Calor en el vapor =  $0.96 WFW h_{stm}$

Según el balance de energía:

Calor disponible + Calor del agua de alimentación = Calor en el vapor + Calor del agua de purga

Entonces:

$$Q + WFW h_{fv} = 0.96 WFW h_{stm} + 0.04 WFW h_{bdn}$$

de ahí:

$$WFW = \frac{Q}{0.96 h_{stm} + 0.04 h_{bdn} - h_{fv}} \quad \text{Kg/hr} \quad \dots \dots 4.4$$

$$STOT = 0.96 WFW \quad \text{Kg/hr} \quad \dots \dots 4.5$$

El cálculo del agua de reposición, el vapor requerido para calentar la alimentación y el flujo de condensado de retorno se obtiene mediante un balance alrededor del asecador.

Balance de materia:

Suponiendo que el 20% del vapor total generado retorna como condensado, entonces:

tonces:

$$WFW = SHTG + WRTH + WRAN$$

$$WRTH = 0.2 STOT$$

de ahí:

$$SHTG = WFW - WRTH - WRAN = WFW - 0.2 STOT - WRAN \quad \text{Kg/hr} \quad \dots \dots 4.6$$

Balance de calor:

$$WFW h_{fv} = SHTG h_{stm} + WRTH h_{ret} + WRAN h_{mu}$$

El requerimiento de agua de reposición se calcula con:

$$WRAN = \frac{WFW(h_{fv} - h_{stm}) + 0.2 STOT(h_{stm} - h_{ret})}{h_{mu} - h_{stm}} \quad \text{Kg/hr} \quad \dots \dots 4.7$$

Añ más, el flujo neto de vapor que se puede utilizar viene dado por:

$$SNET = STOT - SHTG \quad \text{kg/ hr} \quad . . . . 4.8$$

Como se pueda inferir de las ecuaciones anteriores, el uso del condensado de retorno para calentar el agua de alimentación incrementa la cantidad de vapor disponible para utilizarse en alguna carga, tal como una turbina para generar electricidad.

En los E.U., los grandes incineradores que se dedican a la destrucción de desperdicios, a menudo se diseñan con sistemas complejos de generación de vapor utilizando paredes de agua. Estas instalaciones están provistas de ciertas características descritas a continuación:

\* Sección de convección de la caldera: Consiste en un conjunto de tubos de caldera colocados en posición perpendicular al flujo de gases a la salida del incinerador. La mayor porción del calor disponible es capturada por estos tubos, produciéndose vapor saturado.

\* Economizador: Se utiliza para calentar el agua alimentada a la caldera, mediante la extracción del calor de los gases que salen de la sección de convección.

\* Sobrecalentador: Es una sección tubular que normalmente se coloca corriente arriba de la sección de convección. Aquí los gases calientes del incinerador sobrecalientan el vapor saturado generado en la zona de convección.

\* Precalentador de aire: Se utiliza en sustitución, o bien, corriente abajo del economizador. Aquí se produce aire caliente de combustión a partir del gas a temperatura relativamente baja que fluye por esta sección.

Los cálculos para obtener el vapor generado en cada una de estas secciones son complejos y no se describen en el presente trabajo.

Para calcular el calor disponible por los métodos descritos en este capítulo, la temperatura de los gases de salida ( la temperatura de los gases de escape

pe que salen de las secciones de la caldera para entrar a los equipos de control de emisiones gaseosas ) puede suponerse que se encuentra entre los 180 - 360 °C.

[ 29 ]

## CAPITULO 5

## EVALUACION DEL SISTEMA DE INCINERACION

## 5.1 INTRODUCCION

En el presente capítulo se describen los procedimientos y algunas "reglas de dedo" que se pueden utilizar para determinar si el diseño y los criterios de operación del incinerador son consistentes con los requerimientos prácticos municipales e industriales para manejar una capacidad y tipo de desechos específicos.

Los procedimientos de evaluación están enfocados para determinar si: 1) Las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas del desecho han sido correctamente consideradas en el diseño del incinerador. 2) Se han aplicado las consideraciones básicas del diseño. 3) El incinerador es capaz de proporcionar y mantener la temperatura, tiempo de residencia, concentración de oxígeno y turbulencia en un intervalo aceptable para completar la combustión. 4) Si el diseño involucra sistemas de control y de paro automático del proceso para minimizar el riesgo de liberación de contaminantes en caso de falla en algún equipo. 7) Si los materiales de construcción son apropiados.

Estos lineamientos y guías que se presentan para llevar a cabo la evaluación están enfocados principalmente para incineradores de desechos sólidos de horno rotatorio o de horno con parrillas móviles.

Siempre que se deseen evaluar éstos y otros tipos de incineradores se requerirá la asistencia técnica especializada y una mayor información acerca del equipo que se requiere evaluar.

En las siguientes secciones se presenta de una manera simplista los procedimientos de evaluación para los incineradores, en lo que se refiere principalmente a la cámara de combustión, sin mencionar los utilizados para evaluar los sistemas de con-

trol de la contaminación y equipos adicionales, lo cual amerita la realización de un estudio adicional más detallado.

## 5.2 EVALUACION DEL INCINERADOR

Un diagrama lógico de la secuencia de pasos a seguir en la evaluación del diseño y el criterio de operación del incinerador se muestra en la figura 5.1. Este consiste de seis procedimientos de evaluación independientes destinados a responder las siguientes preguntas acerca de algún incinerador que se esté evaluando:

- ¿ Los componentes básicos del incinerador están adecuadamente incorporados en el diseño?
- ¿ Las propiedades físicas, químicas y termodinámicas del desecho se han considerado correctamente en el diseño del incinerador y en las condiciones de operación propuestas?
- ¿ La combinación propuesta de temperatura/aire en exceso/tiempo de residencia es internamente consistente y factible? ¿Se puede obtener una adecuada turbulencia y mezclado bajo esas condiciones?
- ¿ Es aceptable la capacidad utilizada del combustible auxiliar?
- ¿ El diseño involucra un adecuado control del proceso de combustión y dispositivos de seguridad para interrumpir el proceso en caso de ser necesario?
- ¿ Se han empleado materiales de construcción apropiados?

### 5.2.1 CONSIDERACIONES BASICAS DE DISEÑO

Para asegurar la completa combustión de los desechos, el diseño del incinerador debe incluir normalmente un posquemador. La función principal del horno primario es la de convertir los desechos sólidos en gases, lo cual ocurre a través de una

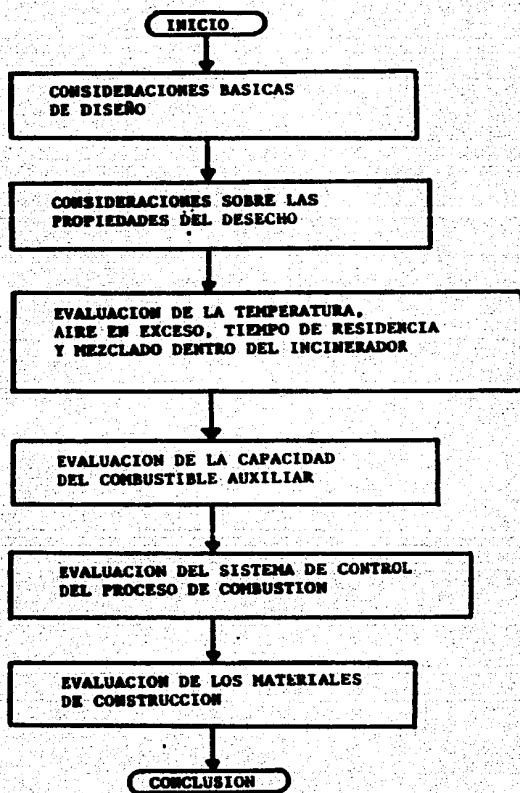


Figura 5.1 Criterios de evaluación del diseño del Incinerador.



sería de volatizaciones, destilaciones destructivas y reacciones parciales de combustión, sin embargo, casi siempre es necesario el uso de un posquemador para completar las reacciones de combustión en fase gaseosa.

Tanto el posquemador como el horno principal, deben estar equipados con un sistema de quemadores de combustible auxiliar o de apoyo para calentar la unidad a la temperatura de operación mientras se inicia el proceso de alimentación de los desechos. Además, es importante revisar la localización del quemador o quemadores dentro del incinerador, así como sus ángulos de acción relativos a la cámara de combustión, asegurándose que la flama produzca una adecuada ignición sobre los desechos transportados dentro de la cámara de combustión y que además la flama generada por el quemador no choque con las paredes del horno para evitar la corrosión de las mismas y el sofocamiento de la flama. Es posible encontrar diseños con quemadores colocados concurrentemente o a contracorriente del flujo de desechos.

### 5.2.2 CONSIDERACIONES SOBRE LAS PROPIEDADES DEL DESECHO

Dentro de las propiedades físicas de los desechos que se deben tomar en cuenta en la evaluación del incinerador en cuanto al sistema de manejo y transporte de basura dentro del mismo, se encuentran, la densidad, forma y tamaño de los desechos, las cuales repercuten en el buen funcionamiento del sistema de parrillas móviles, en el caso de incineradores de horno rectangular o en la operación del incinerador de horno rotatorio, así como en el sistema de alimentación de desechos al incinerador.

Dentro de las propiedades químicas y termodinámicas del desecho que deben ser consideradas en la evaluación del diseño del incinerador, se encuentran: La composición elemental, el valor o poder neto calorífico y otras propiedades especiales tal como algunas características explosivas o tóxicas del desecho, lo cual requiere consideraciones de diseño especiales. Los porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno

no, nitrógeno, azufre y halógenos en el desecho, así como su contenido de humedad deben conocerse para calcular los requerimientos de combustión estequiométrica y la composición y flujo de los gases de combustión, los cuales forman las bases de los procedimientos de evaluación. Además, la composición del desecho en cuanto a su contenido de elementos metálicos, determinan también las necesidades de control de la contaminación, así como de los materiales de construcción que se requieren.

El poder calorífico del desecho, que corresponde a la cantidad de calor que libera el desecho cuando se incinera, determina la necesidad del combustible auxiliar, ya que para mantener la combustión, la cantidad de calor liberado por el desecho incinerado puede ser insuficiente para calentar el desecho crudo que entra a la cámara y elevarlo a la temperatura de ignición para proporcionarle la energía de activación necesaria para que ocurran las reacciones de combustión. La determinación de los valores caloríficos de desecho necesarios para mantener la combustión sin necesidad de combustible auxiliar depende de los siguientes criterios:

- Forma física del desecho
- Temperatura requerida para la destrucción de los desechos
- Flujo de aire en exceso
- Características de transferencia de calor dentro del incinerador

Es decir, para desechos sólidos se requieren altos valores caloríficos del desecho, pero esto depende del tamaño de los sólidos y por consiguiente del área disponible para la transferencia de calor y masa. En la industria de incineración de desechos tóxicos, es práctica común el mezclar estos desechos poco combustibles con materiales combustibles para obtener un poder calorífico global de aproximadamente 4500 Kcal/Kg como mínimo. [ 1 ]

A continuación se presentan los criterios a seguir en la evaluación de las propiedades del desecho en relación al diseño del incinerador:

- 1.- Identificar la composición elemental y contenido de humedad del desecho de g

cuerdo a la tabla 2.2, capítulo 2, o alguna otra fuente de información.

- 2.- Verificar si el desecho contiene materiales fluorados o clorados, en caso de no haberlos, continuar con el paso #5.
- 3.- Comprobar si el hidrógeno contenido en el desecho es suficiente para convertir todo el Cloro y Flúor en HCl y HF respectivamente. ( en caso afirmativo continuar con el paso #5 )
- 4.- Comprobar la existencia de un sistema de inyección de vapor o el empleo de combustible auxiliar que proporcione los equivalentes de hidrógeno necesarios. ( Ver capítulo 3, página 73)
- 5.- Identificar los constituyentes principales de los gases de combustión de acuerdo a la composición elemental del desecho. ( Ec. 3.11 - 3.16 cap. 3 ). Determinar el requerimiento de aire estequiométrico y el flujo de gases de combustión. ( Ec.3.10 - 3.34 cap. 3 ) los cuales se utilizarán en procedimientos de evaluación posteriores.
- 6.- Determinar el valor calorífico neto del desecho. Utilizar la ecuación 3.35.
- 7.- Analizar si es posible que el desecho pueda sostener por sí solo la combustión, basándose en su valor calorífico neto, utilizando la ecuación 3.36 del balance de energía. ( En caso afirmativo continuar con el paso #9 ).
- 8.- Verificar si en el sistema de incineración se quemara combustible auxiliar junto con el desecho.
- 9.- Verificar que las características del incinerador sean compatibles con las propiedades tóxicas y explosivas de los desechos.

### 5.2.3 EVALUACION DE LA TEMPERATURA, AIRE EN EXCESO, TIEMPO DE RESIDENCIA Y MEZCLA DENTRO DEL INCINERADOR.

En general, hay dos factores a revisar en la evaluación de estas variables en cuanto a su relación con el diseño del incinerador. El primer factor consiste en

ver si la temperatura, tiempo de residencia, aire en exceso y grado de turbulencia dentro del incinerador son, en combinación, adecuados para la destrucción eficiente de los desechos. El segundo factor consiste en verificar que estas condiciones de operación sean factibles de obtener, ya que todas ellas están interrelacionadas.

El primer requerimiento básico de cualquier sistema de combustión es un suministro suficiente de aire de combustión para oxidar completamente el material alimentado. Debido a que el mezclado de materiales no es perfecto, se requiere de un cierto exceso de aire para asegurar el contacto entre el aire y el desecho. La cantidad de aire en exceso necesario para una aplicación dada, depende del grado de mezcla aire/desecho que se puede obtener en la zona de combustión primaria. Ya que el aire en exceso actúa como diluyente en el proceso de combustión, éste reduce la temperatura en el incinerador. Esta reducción en la temperatura es deseable cuando se tienen grandes intensidades de combustión, debido a la presencia de desechos con alto poder calorífico, evitando así la degradación del refractario.

Sin embargo, cuando se tienen desechos con bajo poder calorífico y alto contenido de humedad, el exceso de aire debe ser minimizado para conservar la temperatura del sistema tan alta como sea posible. Aún con desecho altamente combustible, es preferible limitar el exceso de aire para que el volumen de la cámara de combustión así como la capacidad requerida de manejo de gases de los equipos anticontaminantes no sean muy grandes. El requerimiento mínimo de aire en exceso para un incinerador determinado depende del grado de turbulencia que se pueda obtener y ciertos factores específicos del desecho. Además, la introducción de un gran exceso de aire a la cámara de combustión a través del quemador es indeseable ya que se pueda sofocar la flama.

En incineración de sólidos, generalmente se requieren de grandes excesos de aire, los cuales varían del 140 al 210%, dependiendo de la temperatura de opera-

ción deseada y el valor calorífico del desecho.

En incineración de desechos sólidos, las temperaturas de operación usuales oscilan entre 700 y 1600°C. Para comprobar si es posible obtener esa temperatura dentro del incinerador de acuerdo al aire en exceso y al combustible auxiliar alimentado, se utiliza la ecuación 3.36 en donde se aplica el balance de calor para el horno. [ 1 ]

Cuatro cuestiones básicas deben considerarse para determinar si la temperatura de operación propuesta es suficiente para la destrucción del desecho.

- ¿Es la temperatura lo suficientemente alta como para calentar todos los componentes del desecho ( e intermediarios de combustión ) por encima de sus temperaturas de ignición y para mantener la combustión?

- ¿Es la temperatura lo suficientemente alta para completar las reacciones que ocurren en el tiempo de residencia propuesto, tanto para los sólidos como para los residuos volátiles y gases crudos?

- ¿La temperatura se encuentra dentro de los límites normales según el diseño del incinerador, y se puede mantener bajo otras condiciones de operación propuestas?

- ¿En que zona de la cámara de combustión se debe mantener dicha temperatura de operación propuesta?

El procedimiento para evaluar la temperatura y el exceso de aire en el incinerador contiene las siguientes consideraciones:

- 1.- Identificar la temperatura propuesta de operación dentro del horno.
- 2.- Verificar si dicha temperatura es suficiente para completar la combustión de los desechos sólidos, asumiendo que se cuenta con un adecuado tiempo de retención, aire en exceso y mezclado. Esta determinación se basa en datos y experiencia de operación en otros incineradores.
- 3.- Identificar el aire en exceso propuesto en el diseño.

- 4.- Ver si el exceso de aire es aceptable de acuerdo a los criterios descritos anteriormente.
  - 5.- De acuerdo a la Ec. 336 del balance de energía, calcular el exceso de aire máximo con el que se puede mantener la temperatura de operación propuesta.
  - 6.- ¿El exceso de aire máximo calculado es mayor que el propuesto en el diseño? ( En caso afirmativo continuar con el paso #9 ).
  - 7.- Verificar si no hay restricciones mecánicas en el sistema de quemadores para poder incrementar la capacidad de combustible auxiliar, requerida para mantener la temperatura de operación propuesta.
  - 8.- Modificar la capacidad del combustible auxiliar alimentada para que el aire en exceso propuesto sea compatible con la temperatura de operación.
  - 9.- Identificar el sitio en el que debe medirse la temperatura y ver si es adecuado en función de los criterios de instrumentación en el incinerador.
- ( Cap. 6 )

El requerimiento de temperatura debe también evaluarse en relación al tiempo de residencia propuesto dentro de la cámara de combustión para que se lleven a cabo los procesos de transferencia de calor y de masa, así como los de oxidación. Estos procesos incrementan su velocidad al aumentar la temperatura, lo cual disminuye el tiempo de residencia necesario.

El estado actual del arte de la incineración no es capaz de permitir la determinación teórica de los requerimientos de temperatura y tiempos de residencia de acuerdo a las propiedades de desecho, por lo que se debe utilizar las condiciones aplicadas en la incineración de desechos similares realizada en otros incineradores de iguales características al que se está evaluando.

El tiempo de residencia necesario aumenta conforme disminuye la temperatura de combustión y se reduce el mezclado dentro de la cámara de combustión y/o el tamaño de partículas a incinerar aumenta.

En la incineración de desechos sólidos es importante destacar que se debe considerar tanto el tiempo de retención de los sólidos dentro del horno así como el tiempo de residencia de los gases dentro del mismo. Como ya vimos, el tiempo de retención de los sólidos en incineradoras industriales y municipales es función principalmente de la velocidad de las parrillas, en incineradoras de cámara rectangular, y de la longitud, diámetro, inclinación y revoluciones por minuto en los incineradores de horno rotatorio.

Para los gases de combustión, el tiempo de residencia varía normalmente de 0.5 a 2.0 segundos, y se puede evaluar utilizando las siguientes ecuaciones:

$$q' = \frac{q (T - 273)}{60 \cdot 293} \quad \text{m}^3/\text{seg} \quad \dots \dots 5.1$$

$$t' = \frac{V}{q'} \quad \text{seg} \quad \dots \dots 5.2$$

donde: T = temperatura °C

q = flujo de gases ( 20 °C ) m<sup>3</sup> std/min de ecuación (3.34)

q' = flujo de gases corregido m<sup>3</sup>/seg

V = volumen de la cámara de combustión

t' = tiempo de residencia de los gases ( segundos )

A continuación se presenta el procedimiento a seguir en la evaluación del tiempo de residencia de los gases dentro del horno:

- 1.- Identificar el tiempo de residencia propuesto en el diseño.
- 2.- Comprobar si este tiempo de residencia es adecuado considerando la temperatura de operación y el aire en exceso propuesto, asumiendo que existe un buen mezclado dentro de la cámara.
- 3.- Verificar la posibilidad de obtener dicho tiempo de residencia, utilizando para ello la ecuación 5.2.

Los tiempos de residencia de los sólidos varían de acuerdo a las características combustibles del tipo de desecho, siendo de 0.5 seg. para ciertos desechos de

carácter explosivo o detonante, 5 minutos para desechos de madera, 15 minutos para desperdicios y basura comercial y 60 minutos para desechos poco combustibles. Estos valores son naturalmente poco aproximados ya que el tiempo de residencia para desechos sólidos de características particulares debe ser determinado experimentalmente o extrapolado de la experiencia de la incineración de desechos similares. [ 10 ]

Procedimiento de evaluación para el tiempo de retención de sólidos en el horno:

- 1.- Identificar el tiempo de retención de sólidos propuesto en el Incinerador.
- 2.- Verificar si dicho parámetro es aceptable de acuerdo a la experimentación o datos de combustión realizados anteriormente.
- 3.- Estimar el tiempo de retención del Incinerador de acuerdo a las ecuaciones (3.63) y (3.67) según el tipo de Incinerador.
- 4.- Determinar si el tiempo de retención necesario lo puede proporcionar el diseño del sistema de transporte de desecho del Incinerador de acuerdo con el cálculo del punto 3.

El requerimiento de temperatura, oxígeno y tiempo de residencia tanto de gases y sólidos, depende de cierta manera del grado de mezclado que se obtenga en la cámara de combustión, al cual depende del grado de turbulencia alcanzado en la misma. La turbulencia se relaciona con el No. de Reynolds para los gases de combustión expresado como:

$$Re = \frac{D u \rho}{\mu}$$

donde: D = diámetro equivalente de la cámara de combustión en m.

u = velocidad superficial de los gases, m/s.

$\rho$  = densidad del gas, Kg/m<sup>3</sup>.

$\mu$  = viscosidad del gas, Kg/m-s

Condiciones adecuadas de turbulencia y mezclado en los gases de combustión



existen con números de Reynolds mayores a 2300 [ 1 ], además, otro parámetro indicativo de una adecuada turbulencia dentro de la cámara es la velocidad superficial de los gases, la cual debe encontrarse entre 3 y 5 m/s. La velocidad superficial se determina mediante la ecuación:

$$u = \frac{q'}{A}$$

donde:  $q'$  = flujo de gases,  $m^3/\text{seg}$  ( Ec. 5.1 )

$A$  = área de la sección transversal de la cámara de combustión,  $m^2$ .

Se debe vigilar también la interacción entre el grado de mezclado obtenido por la velocidad de las parrillas o del horno rotatorio y su efecto sobre el tiempo de residencia de los sólidos, así como la relación entre las cuatro variables; temperatura, aire en exceso, mezclado y tiempo de residencia, para poder llegar a una condición combinada de estos factores que produzcan la operación mas eficiente que se puede obtener del sistema de incineración.

#### 3.2.4 EVALUACION DE LA CAPACIDAD DEL COMBUSTIBLE AUXILIAR

Como ya se dijo antes, el Incinerador debe estar equipado con un sistema de quemadores de combustible auxiliar utilizado para calentar la unidad a la temperatura de operación antes de que el desecho sea introducido y también para mantener la combustión cuando las características de los desechos así lo requieran. Por ello, en la evaluación de la capacidad del combustible auxiliar, se debe tomar en cuenta el poder calorífico de los desechos, el aire en exceso utilizado y la temperatura de operación, los cuales, en la ecuación (3.36) del balance de energía nos determinan el requerimiento de flujo del combustible auxiliar que se debe quer junto con los desechos.

En este aspecto, es muy importante evaluar la capacidad del combustible auxi

liar en conjunción con el sistema de precalentamiento de aire con el que se puede contar en el incinerador, ya que al alimentar aire de combustión precalentado a la cámara gracias a un sistema de intercambio de calor, es posible disminuir la capacidad requerida de combustible auxiliar.

Para evaluar la capacidad del combustible auxiliar en el arranque de las operaciones intermitentes del Incinerador, es válido utilizar la ecuación (3.36) tomando como nulo el aporte de calor por parte de los desechos a incinerar.

### 5.2.5 EVALUACION DEL SISTEMA DE CONTROL DEL PROCESO DE COMBUSTION

Todos los incineradores deben estar equipados con un sistema de control del proceso de combustión para mantener las condiciones de operación deseadas de temperatura y aire en exceso, ( ver capítulo 6 ). Los incineradores de desechos tóxicos deben además contar con sistemas automáticos de interrupción de proceso para prevenir la liberación de materiales tóxicos al medio ambiente en caso de que se apague la flama o fallen los dispositivos de control de la contaminación. En el capítulo 6 se describen los dispositivos de instrumentación y control utilizados más frecuentemente en incineradores.

Procedimiento de evaluación del sistema de control del proceso de combustión:

- 1.- Verificar si el o los quemadores en el horno están equipados con un sistema de supervisión de flama para parar la alimentación del desecho en caso de que se extinga la flama por algún motivo.
- 2.- Ver si el quemador está equipado con un controlador automático para mantener la temperatura entre sus límites máximo y mínimo, mediante la variación del flujo de desechos, del combustible auxiliar o el aire de combustión.
- 3.- Comprobar si el horno está equipado con un control de presión que alerte al operador o al sistema automático para cortar la alimentación en caso de que

se pierda la alimentación negativa a la salida del incinerador.

- 4.- Ver si el quemador cuenta con un control de suministro de aire de manera que se mantenga la estequiometría entre el aire de combustión y el combustible auxiliar.

### 5.2.6 EVALUACION DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION

Ya que los incineradores pueden operar con temperaturas en alrededor de hasta 900 a 1000°C, casi siempre se utilizan recubrimientos refractarios para prevenir de daños a la estructura de acero y además para reducir las pérdidas de calor. ( ver descripción de los materiales en el capítulo 3.5). [ 18 ]

En la tabla 5.1 se muestran varios tipos de refractarios de sílica y aluminosilicatos con su composición química, resistencia a la degradación mecánica o química por diferentes especies que pueden encontrarse en los gases de combustión y sus respectivas temperaturas de fusión. Dicha tabla puede ser utilizada para evaluar la conveniencia de un refractario para una aplicación determinada. [ 1 ]

Cabe mencionar la conveniencia de que la temperatura propuesta de operación esté varios cientos de grados por debajo de la temperatura del material refractario. En adición a la composición del refractario, también se debe considerar la forma física del material refractario en la evaluación del diseño del incinerador. ( ver cap.3.5 sobre la configuración del horno ).

TABLA 5.1 CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS LADRILLOS REFRACTARIOS DE SILICA Y ALUMINOSILICATOS. ( 1 )

TIPO	COMPOSICION TIPICA	TEMPERATURA DE FUSION °C	RESISTENCIA PARA	DEGRADADO POR
Sílica	95% SiO <sub>2</sub>	1700	HCl, NH <sub>3</sub> y escoria ácida	escoria básica Al, Na, Mg, F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> (> 1400°C)
Fireclay alta-duración	54% SiO <sub>2</sub> 40% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1720	ácidos y es corias en general	escorias muy alcalinas a altas temperaturas
Fireclay super-durable	52% SiO <sub>2</sub> 42% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1740	ácidos, HCl, SO <sub>2</sub> y NH <sub>3</sub>	escoria básica Na, Mg, F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> (> 1400°C)
Anti-ácido ( tipo H )	59% SiO <sub>2</sub>	1670	Excelente para la mayoría de los ácidos	HF, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
Alta-Alúmina	50-85% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1700-1870	HCl, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub>	escoria básica Na, Mg, F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> (> 1400°C)
Extra-alta-Alúmina	90-99% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1650-2010	HCl, HF, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , S <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub>	Na, F <sub>2</sub> (> 1000°C)
Mullita	71% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1810	HCl, SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>	Na, F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> (> 1400°C)

## CAPITULO 6

### INSTRUMENTACION Y CONTROL EN SISTEMAS DE INCINERACION

#### 6.1 INTRODUCCION

Al igual que en cualquier proceso de carácter químico bien diseñado, los incineradores requieren de instrumentación y de ciertos controles. Estos equipos auxiliares se utilizan para indicar, registrar y controlar ciertas condiciones físicas del proceso tales como la temperatura, flujo, tiempo, velocidad, etc.

Los requerimientos operacionales en los modernos incineradores de desechos hacen necesario el uso de técnicas de instrumentación relativamente sofisticadas. Debido a que los incineradores, especialmente aquellos de desechos municipales, tienen que manejar un flujo de desechos que constantemente varía en su composición, se producen cambios en las condiciones de combustión que requieren de un control efectivo de un cierto número de variables con el fin de mantener estables las condiciones de operación.

Dichas técnicas de instrumentación se aplican para cumplir con los siguientes objetivos: 1) efectuar la completa combustión del desecho, reduciéndolo a un volumen mínimo de materiales que son inofensivos y además fácilmente manejables para su disposición final. 2) Prevenir la liberación de gases tóxicos y de humos a la atmósfera. Los sistemas de instrumentación descritos en este capítulo ayudan en la operación del incinerador para cumplir con estos propósitos bajo las condiciones variables de los desechos combustibles alimentados y además contribuyen a proteger al incinerador y los demás equipos asociados de daños causados por grandes fluctuaciones y/o altas temperaturas.

En la figura 6.1 se muestra un diagrama esquemático de un incinerador de desechos típico como el mostrado en el capítulo 1. El del presente capítulo se presenta para indicar las zonas principales en las que se requiere de instrumentación

para la adecuada operación del sistema.

En esta figura 6.1, el desecho se alimenta a través del ducto de alimentación A, el secado e ignición de los desechos se realiza en la parrilla de secado B y la combustión en la parrilla C. El aire secundario de enfriamiento se introduce a través de los ductos de aire sobre las parrillas Q mediante un ventilador de tiro forzado E. El residuo de combustión cae en el depósito de cenizas F para su disposición final. Los gases calientes continúan quemándose en la cámara de combustión G para después pasar por la cámara de asentamiento H donde se retienen las partículas volátiles mas pesadas. En la cámara de aspersión J los gases se enfrían hasta una temperatura adecuada mediante un sistema de espesas de agua. Posteriormente los gases se enfrían por dilución con aire proveniente de las compuertas reguladoras K antes de pasar por el equipo de colección de polvos L, el ventilador de tiro inducido M y al exterior de la chimenea N. En caso de falla en el sistema de enfriamiento o alguna otra condición de emergencia, se emplea una compuerta P de gases de escape para derivarlos directamente hacia la chimenea.

En el siguiente apartado se presentan los sistemas de instrumentación básicos que representan el mínimo de requerimientos para operar el incinerador adecuadamente.

## 6.2 CONTROLES BASICOS EN LA OPERACION DE INCINERADORES.

### CONTROL DE AIRE BAJO LAS PARRILLAS

Para efectuar la completa combustión de los desechos, se debe introducir bajo las parrillas una cantidad adecuada de aire de combustión, sin embargo, demasiado aire arrastrará consigo partículas sólidas en la corriente de gases, aumentando así

I N C I N E R A D O R      M U N I C I P A L

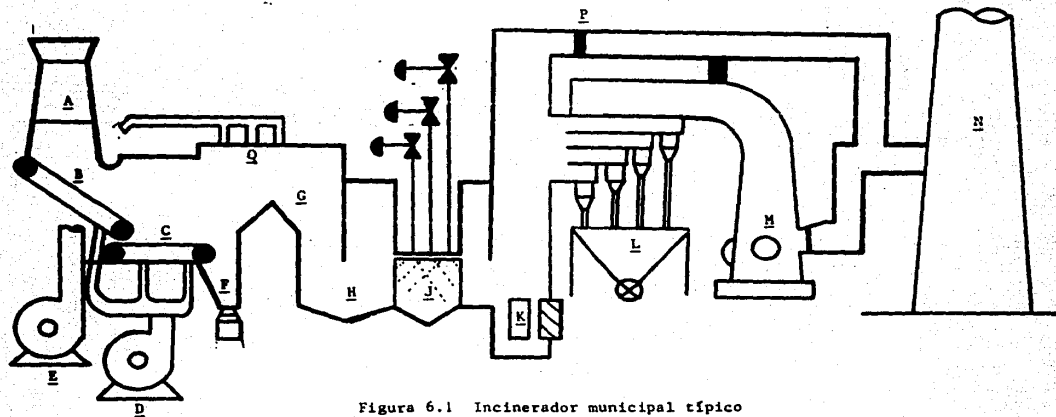


Figura 6.1 Incinerador municipal típico

la carga de contaminantes en el aire.

Debido a la naturaleza no homogénea de los desechos sobre las parrillas, el flujo de aire bajo las mismas tiende a variar considerablemente con la densidad de los desperdicios sobre la parrilla, por lo que, con el fin de asegurar un flujo de aire adecuado, es deseable controlar el flujo de aire en el sistema.

En la figura 6.2 se muestra un esquema de tal sistema de control. El aire que fluye en el ducto bajo la parrilla se mide y controla en un valor predeterminado de manera que aún cuando la resistencia al flujo de aire varía según la naturaleza del desecho sobre la parrilla, el flujo de aire permanezca constante.

#### CONTROL DE TEMPERATURA EN EL HORNO

Para asegurar la combustión completa de todos los materiales volátiles, la temperatura a la salida del horno debe mantenerse normalmente entre los 900 y - 1000°C. Este rango puede variar de acuerdo al diseño y configuración del horno y tipo de desecho. La temperatura se puede elevar o disminuir mediante el control de aire alimentado sobre las parrillas. Si se deja que la temperatura baje demasiado, algunos gases odoríferos y materiales crudos pueden escapar hacia la atmósfera. Si en cambio la temperatura se incrementa demasiado o varía rápidamente, el material del horno se puede dañar. [ 36 ]

En la figura 6.3 se presenta la forma más simple en la que se puede controlar la temperatura. Cuando se alimenta desecho seco al horno, se debe permitir la entrada de una mayor cantidad de aire para obtener la temperatura deseada. Si en cambio se alimenta desecho húmedo al horno, la temperatura cae debido al calor requerido para evaporar la humedad adicional, por lo que se debe entonces disminuir el aire sobre la parrilla para no diluir y enfriar demasiado los gases. La temperatura se detecta mediante un termopar de cromo-aluminio montado en la pared o en el techo de la cámara de combustión. La señal térmica del termopar se compara en el controlador



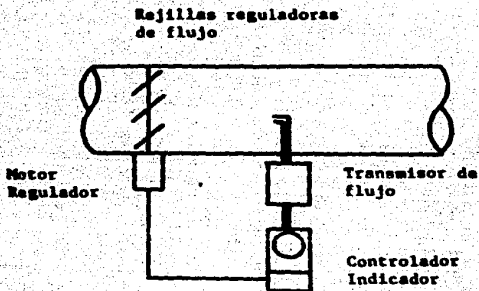


Figura 6.2 Sistema de control de aire bajo las parrillas

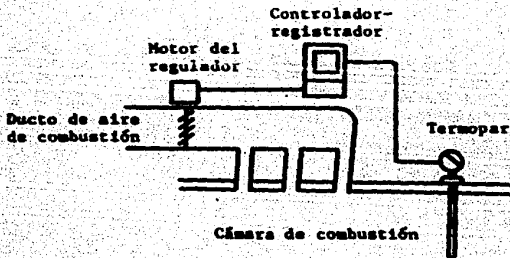


Figura 6.3 Control de temperatura en el horno

con la temperatura deseada con lo cual la salida del controlador posiciona adecuadamente al regulador de aire sobre la parrilla por medio de un motor eléctrico.

#### CONTROL DE PRESION DENTRO DEL HORNO

Como el sistema de control de la temperatura dentro del horno está constantemente variando la cantidad total de aire mediante los ventiladores de tiro forzado, se necesita un sistema de control de tiro para mantener la presión adecuada dentro del horno. La figura 6.4 ilustra un sistema típico de control de tiro que regula la presión dentro del horno mediante el control de la velocidad del ventilador de tiro inducido. La presión se mide en la cámara de combustión usando un transductor de presión en el cual la señal de presión del transmisor se compara con la presión deseada mediante el controlador, el cual produce una señal para incrementar o decrementar la velocidad del ventilador de tiro inducido tanto como sea necesario. Generalmente, dentro del horno debe haber un vacío de alrededor de 2 pulgadas de mercurio para asegurar el flujo de gases hacia los equipos de lavado y escape de gases. [ 34 ]

#### CONTROL DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Para evitar daños en el colector de polvos y en el ventilador de tiro inducido, los gases calientes del horno ( 900 a 1000°C ) deben enfriarse hasta aproximadamente 350°C. Como vimos en el capítulo 4, este enfriamiento se puede lograr mediante el uso de un sistema de recuperación de calor o también con el sistema utilizado en el incinerador de la figura 6.1 que no tiene recuperación de calor [ 34 ]. Aquí el enfriamiento se efectúa mediante bancos de esparado de agua y/o por dilución de los gases usando aire exterior. Las cantidades relativas de agua y aire se determinan comparando el costo del agua contra el costo de la capacidad del ventilador requerido. Para aumentar la flexibilidad del control, los sistemas de control del agua y aire de enfriamiento deben ser independientes. En la figura 6.5 se mues-

tra un sistema típico de control en la cámara de aspersión en donde los termopares montados a la salida de la cámara de aspersión producen una señal proporcional a la temperatura promedio de la corriente de gases y dicha señal es comparada con la temperatura deseada en el controlador, el cual modula las válvulas motorizadas que suministran agua al banco de espesas manteniéndose así la temperatura deseada. En este sistema se debe instalar una alarma para altas temperaturas para abrir la derivación de emergencia en caso de que se exceda un límite determinado. Como una protección adicional, generalmente se instala un detector de presión para encender una alarma en caso de una baja en la presión de agua que alimenta los bancos de espesas. Debido a que el agua de enfriamiento es costosa, es necesario llevar un registro exacto del gasto de agua utilizada lo cual se puede hacer midiendo el flujo de agua por medio de un plato de orificio en la línea de suministro de agua. En caso de que la configuración del ducto de gases haga difícil la obtención de una lectura promedio de temperaturas confiable, se hace necesario hacer mediciones de temperatura en varios puntos del ducto, utilizando un dispositivo que controle el banco de espesas de acuerdo con la temperatura mas alta que sea detectada.

Otra manera de llevar a cabo el enfriamiento de los gases de escape consiste en la dilución con aire del exterior. Aquí el sistema de control de aire de enfriamiento como el mostrado en la figura 6.6 es similar al de la cámara de espray, ya que la señal proveniente del controlador modula al motor de la compuerta que regula la cantidad de aire exterior que se introduce en este punto. Adicionalmente se instala un detector-interruptor en la entrada del colector de polvos para cerrar la compuerta de aire en caso de que exista una presión positiva en este punto del sistema.

#### CONTROL DE LA CAPACIDAD DEL COLECTOR DE POLVOS

Algunos de los modernos incineradores utilizan el sistema de ciclones múlti-

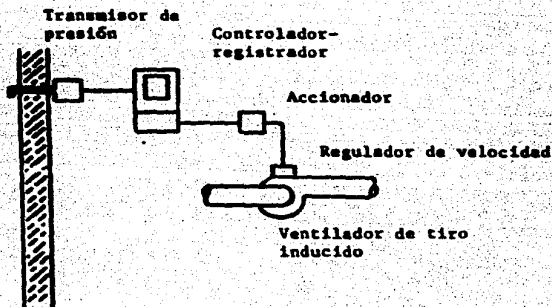


Figura 6.4 Control de presión dentro del horno

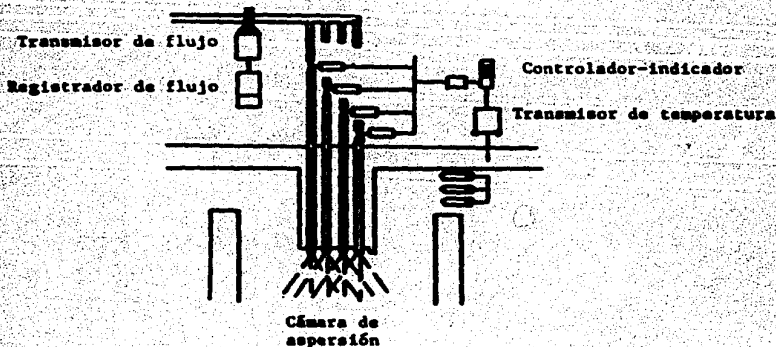


Figura 6.5 Control de temperatura en la cámara de aspersión

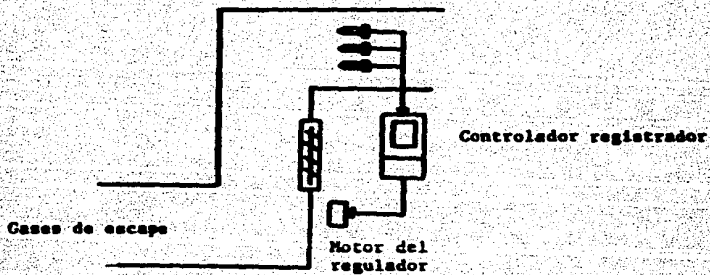


Figura 6.6 Sistema de control del aire de enfriamiento

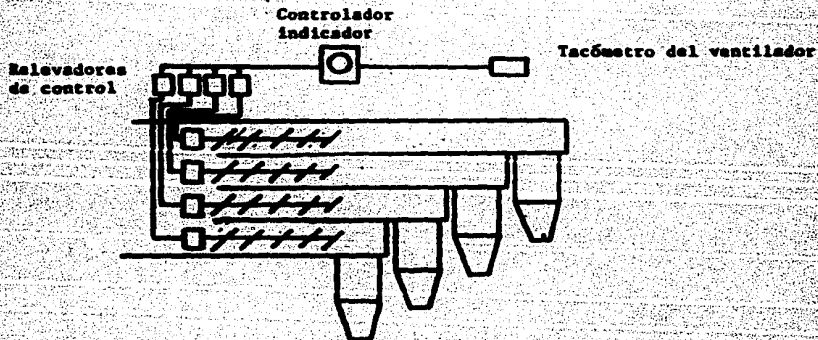


Figura 6.7 Control del colector de polvos

bles colectores, para la remoción de cenizas volátiles de la corriente de gases de escape. Ya que los ciclones colectores son más eficientes para ciertas velocidades de gas, el número de unidades colectoras en operación se determina por la velocidad de los gases en el ducto de salida, con lo cual se asegura la operación del sistema de recolección de partículas a su máxima eficiencia. Ver figura 6.7. Como el flujo total de gases a través de los colectores es proporcional a la velocidad del ventilador de tiro inducido, esta velocidad es utilizada para regular el número de unidades colectoras en operación. La velocidad se mide mediante un tacómetro generador de corriente directa la cual constituye una señal de velocidad que opera a través de unos relevadores los cuales actúan en los motores reguladores de dos posiciones para poner en operación el número adecuado de unidades de colección, obteniendo así la mayor eficiencia en el control de cenizas volátiles.

### 6.3 CONTROLES E INDICADORES DE CONDICIONES DE OPERACION

#### INDICADORES DE PRESION

Los indicadores de tiro mecánico deben instalarse en los siguientes puntos del incinerador para medir la presión:

- 1) ductos de aire bajo las parrillas
- 2) compartimientos de las parrillas y diferentes zonas del hogar
- 3) ductos de aire sobre las parrillas
- 4) a la salida del horno
- 5) colector de polvos ( medidor diferencial a través del colector )
- 6) entrada al ventilador de tiro inducido
- 7) entrada al colector de polvos

### INDICADORES DE TEMPERATURA

En la operación del incinerador es conveniente que se tenga una supervisión de la temperatura mediante un indicador múltiple que registre y muestre la temperatura en los siguientes puntos:

- 1) a la salida de la cámara de combustión
- 2) a la salida de la cámara de asentamiento de cenizas
- 3) a la salida de la cámara de aspersión
- 4) a la entrada del colector de polvos
- 5) a la salida del colector de polvos
- 6) en la chimenea de gases de escape

Esta localización de zonas importantes de medición, depende por supuesto de los equipos auxiliares anticontaminantes que incluya el diseño del incinerador.

### INDICADORES DE FLUJO

Debido al aumento de las normas restrictivas de contaminación, la operación del incinerador debe ser mas estrechamente controlada en lo que se refiera a los flujos de aire de combustión y enfriamiento alimentados al incinerador. Para ello, el operador debe disponer de indicadores de flujo de aire que muestren situaciones críticas. Estos indicadores involucran al aire bajo las parrillas en cada una de sus diferentes zonas, el flujo total de aire bajo las parrillas y el flujo total de aire sobre las parrillas. En la práctica, estos flujos deben ser continuamente supervisados y/o registrados selectivamente por el operador por medio de un botón indicador en el tablero de control.

### DENSIDAD DEL HUMO

Con el fin de no contravenir los requerimientos legales de contaminación, es

conveniente que el operador sea continuamente informado de las condiciones de los gases que entran a la chimenea.

En la figura 6.8 se ilustra un sistema de registro de la densidad del humo por medios fotoeléctricos, en donde la fuente luminosa se instala en un lado del ducto y la unidad fotoeléctrica se coloca del lado opuesto. Para elegir la localización de este indicador, se deben considerar la temperatura, la accesibilidad para el mantenimiento y otros factores. Tanto el humo como las cenizas que pasan a través del sistema reducen la luz transmitida a la fotocelda, cuya salida se alimenta a un registrador provisto de una alarma en caso de aumentar considerablemente la densidad o grado de opacidad de los humos. Este sistema de detección fotoeléctrico se instala preferentemente entre el colector de polvos y el ventilador de tiro inducido, ya que se elimina la necesidad de purgar el aire por la presión negativa existente en este punto.

#### ALARMAS

En el sistema de control del incinerador se debe instalar un tablero que identifique y alerte las siguientes fallas o malos funcionamientos del proceso:

- 1) alta temperatura en el ducto de alimentación
- 2) alta temperatura en las parrillas de combustión
- 3) baja presión en el ducto de aire bajo las parrillas
- 4) baja presión en el ducto de aire sobre las parrillas
- 5) alta temperatura a la salida del horno
- 6) alta presión a la salida del horno
- 7) alta temperatura a la salida de la cámara de aspersión
- 8) alta temperatura a la entrada del colector de polvos
- 9) baja presión del agua de aspersión
- 10) alta densidad de humos



ii) altas temperaturas en la chimenea

### CONTROL EN CASCADA

Hasta este punto sólo hemos mencionado los sistemas de control en forma independiente, sin embargo, la interrelación de las variables a ser controladas es vital, que es necesario interconectar dichos sistemas de control. Por ejemplo, si la densidad del humo se incrementa es probable que exista una cantidad insuficiente de aire sobre las parrillas para completar la combustión de las partículas orgánicas en los gases de escape. En la figura 6.9 se muestra un esquema de instrumentación en el que el controlador de la densidad de humos está capacitado para regular el flujo de aire sobre las parrillas en caso de aumento en la densidad de los humos.

La temperatura del horno depende de un número de factores incluyendo entre ellos la naturaleza de los desechos a ser incinerados y la cantidad de aire sobre y bajo las parrillas. Ya que la naturaleza del desecho no se puede controlar la temperatura depende de dos variables controlables; el flujo de aire sobre las parrillas y el flujo de aire bajo las parrillas. En la figura 6.10 se presenta un esquema del control en cascada que se utiliza para cumplir con este propósito. Aquí, la señal del control de temperatura del horno, en unión con la del controlador del aire sobre las parrillas se alimenta a un relacionador para que regule a su vez al controlador del aire bajo las parrillas, de manera que conforme se incrementa el flujo de aire sobre las parrillas, el aire bajo las parrillas se disminuye para efectuar el control del aire de alimentación de una forma más eficaz. El relacionador proporciona el equilibrio necesario para que la proporción entre los flujos de aire sobre y bajo las parrillas se encuentre dentro de los límites razonables de estequiometría y aire en exceso.

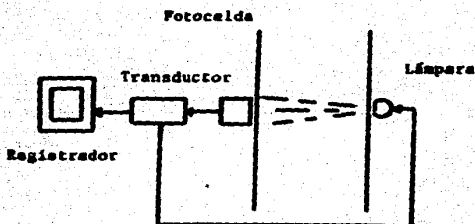


Figura 6.8 Control de la densidad de humos en el escape

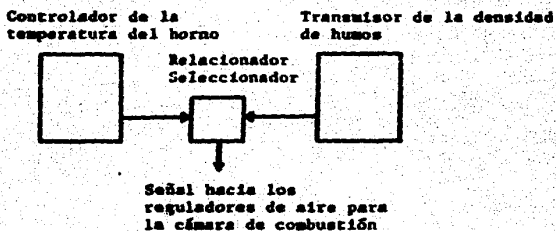


Figura 6.9 Control en cascada de la densidad de los humos y la temperatura del horno

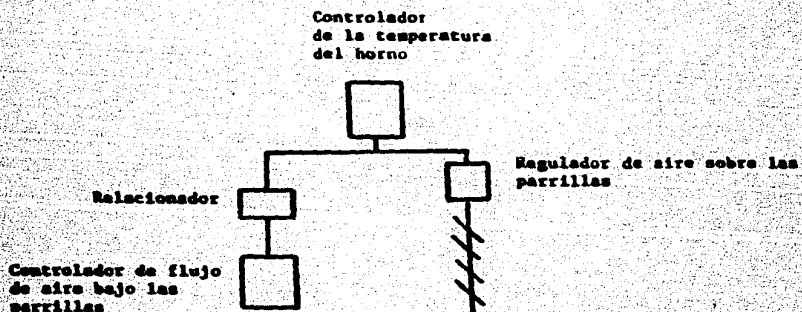


Figura 6.10 Control en cascada del aire sobre y bajo las parrillas

## OTROS TIPOS DE INSTRUMENTACION

Debido a que la operación del incinerador se ve afectada por las condiciones prevaletientes, es conveniente indicar y registrar la temperatura del aire en el exterior, la presión barométrica, velocidad y dirección del viento.

Además, el diseño apropiado de cualquier sistema de control debe incluir dispositivos especiales para condiciones de emergencia tales como pérdida de energía eléctrica, muy altas temperaturas, falla de ventiladores, etc. En donde los interruptores de proceso necesarios deben incluirse para obtener la máxima protección posible para los equipos así como para los operadores.

En la tabla 6.1 se enlistan los instrumentos típicos que monitorean y controlan las condiciones de operación en los incineradores.

TABLA 6.1 INSTRUMENTACION EN INCINERADORES

PARAMETRO A CONTROLAR	TIPOS DE INSTRUMENTOS
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pirómetros ópticos para temperatura de pared y de flama en el rango de 1000 a 1400° C.</li> <li>- Termopares de nudos para temperaturas ambiente tales o mayores.</li> </ul>
Tiro	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manómetros y medidores de presión de columna de agua inclinados para medir vacío.</li> <li>- Sensores mecánicos de diafragma para lecturas en el exterior.</li> </ul>
Flujo de gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medidores venturi o de orificio con lecturas de presión diferencial.</li> <li>- Tubos de Pitot.</li> </ul>
Flujo de líquido	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Orificios con lecturas de presión diferencial.</li> <li>- Medidores de flujo de tipo dinámico.</li> </ul>
Eléctrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltímetro, Amperímetro.</li> </ul>
Densidad del humo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analizador fotoeléctrico de haz de luz.</li> </ul>

continúa

**Movimiento**

- Tacómetros para medir la velocidad de los motores del ventilador, accionadores del transportador, parrillas u horno rotatorio

**Peso**

- Básculas de plataforma para camiones de carga, para medir cantidades de los desperdicios que entran, residuos que salen, cenizas recolectadas, etc.
- 

La operación del incinerador, como ya se ha visto, involucra el control de ciertas variables complejas interrelacionadas, por lo que la utilización de las técnicas modernas tales como el control en cascada y el uso de relacionadores de variables, junto con el uso de las técnicas convencionales hacen posible un control mas efectivo de dichas variables, logrando así la operación mas eficiente del sistema de incineración. [ 36 ]

## CONCLUSIONES

El principio básico del proceso de incineración de desechos sólidos es la transformación del material en un gas, el cual es liberado a la atmósfera, y en un residuo sólido relativamente inerte y libre de sustancias contaminantes. Una de las ventajas principales del proceso de incineración es que reduce el volumen de los desechos sólidos combustibles en un 80 a 90%.

La descripción breve del proceso es la siguiente: los residuos sólidos son cargados al horno por medio de una grúa a través de un canal de alimentación y posteriormente caen al horno el cual está provisto de un quemador para proporcionar la ignición a los desechos. El aire de combustión es introducido al horno en la parte baja de éste y a través de las parrillas y también en la parte superior de la cámara de combustión por medio de una ventilación forzada, con lo cual se controla la velocidad de quemado. Los productos finales del proceso de incineración son gases de combustión que antes de ser arrojados a la atmósfera han sido enfriados en un economizador y/o precalentador y además purificados en equipos anticontaminantes.

La combustión de la basura dentro del incinerador está controlada por la temperatura, turbulencia y tiempo de residencia de los desechos, los cuales son los parámetros de más importancia en la operación, ya que de ello depende la eficiencia de la combustión y la pureza de los gases de escape.

Como vimos en los capítulos precedentes existen grandes deficiencias de información en muchas áreas de la tecnología de incineradores y además mucha de la información que actualmente se utiliza en el diseño de los mismos es empírica, incompleta y basada en observaciones poco confiables, por lo que se debe buscar un cambio en la manera con que se llega al diseño del incinerador con datos aproximados.

Es por esto que las bases empíricas deben y de hecho están siendo reemplazadas por información analítica más exacta, mejor correlacionada lo cual nos permite llegar a diseños que combinan las mejores condiciones de operación con los menores costos y un mayor tiempo de servicio del equipo.

## A P E N D I C E I

## NOMENCLATURA DEL CAPITULO 3

## Parte 3.1

- C - Contenido de Carbono en el desecho, adimensional, Kg C/Kg desecho
- $C_f$  - Contenido de Carbono en el combustible auxiliar, Kg C/Kg comb.
- $C_k$  - Contenido de Carbono en la alimentación, Kg C/Kg alim
- $CO_{2k}$  - Flujo de  $CO_2$  en los gases de combustión, Kg  $CO_2$ /Kg alim
- $Cl_2$  - Contenido de Cloro en el desecho, Kg  $Cl_2$ /Kg desecho
- $Cl_k$  - Contenido de Cloro en la alimentación, Kg  $Cl_2$ /Kg alim
- $CP_k$  - Flujo de gases de combustión, Kg gas/Kg alim
- CG - Flujo total de gases de combustión, Kg gas/Kg alim
- EA - Porcentaje de aire en exceso alimentado, %
- F - Gasto de desecho alimentado al horno, Kg desecho / hr
- FT - Gasto total de desecho-combustible alimentado, Kg alim/ hr
- $F_2$  - Contenido de Flúor en el desecho, Kg  $F_2$ /Kg desecho
- $F_k$  - Contenido de Flúor en la alimentación, Kg  $F_2$ /Kg alim
- $FCO_2$  - Fracción masa de  $CO_2$  en los gases de escape, Kg  $CO_2$ /Kg gas
- $FH_2O$  - Fracción masa de  $H_2O$  en los gases de escape, Kg  $H_2O$ /Kg gas
- $FHCl$  - Fracción masa de HCl en los gases de escape, Kg HCl/Kg gas
- $FHF$  - Fracción masa de HF en los gases de escape, Kg HF/Kg gas
- $FN_2$  - Fracción masa de  $N_2$  en los gases de escape, Kg  $N_2$ /Kg gas
- $FO_2$  - Fracción masa de  $O_2$  en los gases de escape, Kg  $O_2$ /Kg gas
- $FSO_2$  - Fracción masa de  $SO_2$  en los gases de escape, Kg  $SO_2$ /Kg gas
- H - Contenido de Hidrógeno en el desecho, Kg H/Kg desecho
- $H_f$  - Contenido de Hidrógeno en el combustible, Kg H/Kg comb.
- $H_k$  - Contenido de Hidrógeno en la alimentación, Kg H/Kg alim
- $H_2O$  - Contenido de humedad en el desecho, Kg  $H_2O$ / Kg desecho
- $H_2O_k$  - Contenido de humedad en la alimentación, Kg  $H_2O$ /Kg alim
- $H_2O_{kp}$  - Flujo de  $H_2O$  en los gases de combustión, Kg  $H_2O$ /Kg alim
- $HCl_k$  - Flujo de HCl en los gases de combustión, Kg HCl/Kg alim
- $HF_k$  - Flujo de HF en los gases de combustión, Kg HF/Kg alim
- HHV - Poder calorífico superior del desecho, Kcal/Kg desecho



- $M$  = Peso molecular del gas de combustión, Kg/Kg mol  
 $m_f$  = Gasto de combustible auxiliar, Kg combustible/ hr  
 $N$  = Contenido de Nitrógeno en el desecho, Kg  $N_2$ /Kg desecho  
 $N_f$  = Contenido de  $N_2$  en el combustible, Kg  $N_2$ /Kg comb.  
 $N_k$  = Contenido de  $N_2$  en la alimentación, Kg  $N_2$ /Kg alim  
 $N_{2k}$  = Flujo de  $N_2$  en los gases de combustión, Kg  $N_2$ /Kg alim  
 $(N_2)_{EA}$  =  $N_2$  adicional alimentado por el aire en exceso, Kg  $N_2$ /Kg alim  
 $HMV$  = Poder calorífico neto del desecho, Kcal/Kg desecho  
 $HMF$  = Poder calorífico neto del combustible auxiliar, Kcal /Kg comb.  
 $n_f$  = Combustible auxiliar requerido, Kg comb. / Kg desecho  
 $O_2$  = Contenido de  $O_2$  en el desecho, Kg  $O_2$ /Kg desecho  
 $O_k$  = Contenido de  $O_2$  en la alimentación, Kg  $O_2$ /Kg alim  
 $(O_2)_{EA}$  =  $O_2$  adicional alimentado por el aire en exceso, Kg  $O_2$ /Kg alim  
 $(O_2)_{esteq(k)}$  = Requerimiento de  $O_2$  de combustión, Kg  $O_2$ /Kg alim  
 $(O_2)_{esteq(w)}$  = Requerimiento de  $O_2$  de combustión, Kg  $O_2$ /Kg desecho  
 $Q_f$  = Capacidad del combustible auxiliar, Kcal / hr  
 $q$  = Flujo volumétrico total de gases de combustión,  $m^3$ / Kg alim  
 $S$  = Contenido de Azufre en el desecho, Kg S/Kg desecho  
 $S_f$  = Contenido de Azufre en el combustible auxiliar, Kg S/Kg comb.  
 $S_k$  = Contenido de Azufre en la alimentación, Kg S/Kg comb.  
 $SO_{2k}$  = Flujo de  $SO_2$  en los gases de combustión, Kg  $SO_2$ /Kg alim  
 $T$  = Temperatura de combustión, ° C  
 $T_{air}$  = Temperatura de alimentación del aire precalentado, ° C  
 $VCO_2$  = Flujo volumétrico de  $CO_2$ ,  $m^3$ /kg alim  
 $VH_2O$  = Flujo volumétrico de  $H_2O$ ,  $m^3$ /Kg alim  
 $VN_2$  = Flujo volumétrico de  $N_2$ ,  $m^3$ /Kg alim  
 $VO_2$  = Flujo volumétrico de  $O_2$ ,  $m^3$ /Kg alim

### Parte 3.2

- $A$  = Area de combustión sobre las parrillas mecánicas,  $m^2$   
 $F$  = Capacidad del incinerador, Kg / hr  
 $Va$  = Velocidad de quemado por unidad de área, Kg / hr  $m^2$   
 $I$  = Intensidad de combustión, Kcal/ hr  $m^3$

- KI = Factor logarítmico del desecho  $\text{Kg} / \text{hr m}^2$
- K = Factor de desecho Essenhigh,  $(\text{Kg}/\text{hr m}^3)^{2/3}$
- W = Anchura de la cámara de combustión, m
- L = Longitud de la cámara de combustión, m
- H = Altura de la cámara de combustión, m
- Vc = Volumen de la cámara de combustión,  $\text{m}^3$
- B = Poder calorífico superior del desecho, Kcal/Kg
- a = Relación ancho-alto del horno, adim.
- b = Relación Largo alto del horno, adim.
- c = Factor de configuración de la cámara de combustión, adim.
- R = Relación de factores KI/K
- n = Coeficiente experimental para evaluar KI
- m = Coeficiente experimental para evaluar KI
- b = Coeficiente experimental para evaluar KI

### Parte 3.3

- D = Densidad del desecho,  $\text{Kg} / \text{m}^3$
- F = Capacidad del incinerador,  $\text{Kg} / \text{hr}$
- Fv = Volumen incinerado por unidad de tiempo,  $\text{m}^3 / \text{hr}$
- H = Altura de la cámara de combustión, m
- L = Longitud de la cámara de combustión, m
- L<sub>f</sub> = Longitud de la flama, m
- F = Profundidad del lecho de basura, m
- Q<sub>f</sub> = Capacidad del quemador, Kcal/ hr
- TR = Tiempo de residencia del desecho, horas
- VEL = Velocidad de transporte de las parrillas, m / hr
- W = Ancho de la cámara de combustión, m

### Parte 3.4

- DI = Diámetro del horno rotatorio, m
- L = Longitud del horno rotatorio, m
- rpm = Revoluciones por minuto
- $\alpha$  = Inclinación del horno, cm/m de longitud.
- t = Tiempo de residencia, minutos
- V = Volumen de la cámara de combustión,  $\text{m}^3$

- M** = Peso molecular del gas de combustión, Kg/Kg mol  
 **$m_f$**  = Costo de combustible auxiliar, Kg combustible/ hr  
**N** = Contenido de Nitrógeno en el desecho, Kg  $N_2$ /Kg desecho  
 **$N_f$**  = Contenido de  $N_2$  en el combustible, Kg  $N_2$ /Kg comb.  
 **$N_k$**  = Contenido de  $N_2$  en la alimentación, Kg  $N_2$ /Kg alim  
 **$N_{2k}$**  = Flujo de  $N_2$  en los gases de combustión, Kg  $N_2$ /Kg alim  
 **$(N_2)_{EA}$**  =  $N_2$  adicional alimentado por el aire en exceso, Kg  $N_2$ /Kg alim  
**MHV** = Poder calorífico neto del desecho, Kcal/Kg desecho  
**MHF** = Poder calorífico neto del combustible auxiliar, Kcal /Kg comb.  
 **$n_f$**  = Combustible auxiliar requerido, Kg comb. / Kg desecho  
 **$O_2$**  = Contenido de  $O_2$  en el desecho, Kg  $O_2$ /Kg desecho  
 **$O_k$**  = Contenido de  $O_2$  en la alimentación, Kg  $O_2$ /Kg alim  
 **$(O_2)_{EA}$**  =  $O_2$  adicional alimentado por el aire en exceso, Kg  $O_2$ /Kg alim  
 **$(O_2)_{esteq(k)}$**  = Requerimiento de  $O_2$  de combustión, Kg  $O_2$ /Kg alim  
 **$(O_2)_{esteq(v)}$**  = Requerimiento de  $O_2$  de combustión, Kg  $O_2$ /Kg desecho  
 **$Q_f$**  = Capacidad del combustible auxiliar, Kcal / hr  
**q** = Flujo volumétrico total de gases de combustión,  $m^3$ / Kg alim  
**S** = Contenido de Azufre en el desecho, Kg S/Kg desecho  
 **$S_f$**  = Contenido de Azufre en el combustible auxiliar, Kg S/Kg comb.  
 **$S_k$**  = Contenido de Azufre en la alimentación, Kg S/Kg comb.  
 **$SO_{2k}$**  = Flujo de  $SO_2$  en los gases de combustión, Kg  $SO_2$ /Kg alim  
**T** = Temperatura de combustión, ° C  
**T air** = Temperatura de alimentación del aire precalentado, ° C  
 **$VCO_2$**  = Flujo volumétrico de  $CO_2$ ,  $m^3$ /Kg alim  
 **$VH_2O$**  = Flujo volumétrico de  $H_2O$ ,  $m^3$ /Kg alim  
 **$VN_2$**  = Flujo volumétrico de  $N_2$ ,  $m^3$ /Kg alim  
 **$VO_2$**  = Flujo volumétrico de  $O_2$ ,  $m^3$ /Kg alim

### Parte 3.2

- A** = Área de combustión sobre las parrillas mecánicas,  $m^2$   
**F** = Capacidad del incinerador, Kg / hr  
 **$F_a$**  = Velocidad de quemado por unidad de área, Kg / hr  $m^2$   
**I** = Intensidad de combustión, Kcal/ hr  $m^3$

- K1 = Factor logarítmico del desecho  $\text{Kg} / \text{hr m}^2$
- K = Factor de desecho Essenhig,  $(\text{Kg/hr m}^3)^{2/3}$
- W = Anchura de la cámara de combustión, m
- L = Longitud de la cámara de combustión, m
- H = Altura de la cámara de combustión, m
- Vc = Volumen de la cámara de combustión,  $\text{m}^3$
- B = Poder calorífico superior del desecho,  $\text{Kcal/Kg}$
- a = Relación ancho-alto del horno, adim.
- b = Relación Largo alto del horno, adim.
- c = Factor de configuración de la cámara de combustión, adim.
- R = Relación de factores K1/K
- n = Coeficiente experimental para evaluar K1
- m = Coeficiente experimental para evaluar K1
- b = Coeficiente experimental para evaluar K1

### Parte 3.3

- D = Densidad del desecho,  $\text{Kg} / \text{m}^3$
- F = Capacidad del incinerador,  $\text{Kg} / \text{hr}$
- Fv = Volumen incinerado por unidad de tiempo,  $\text{m}^3 / \text{hr}$
- H = Altura de la cámara de combustión, m
- L = Longitud de la cámara de combustión, m
- L<sub>f</sub> = Longitud de la flama, m
- P = Profundidad del lecho de basura, m
- Q<sub>g</sub> = Capacidad del quemador,  $\text{Kcal/hr}$
- TR = Tiempo de residencia del desecho, horas
- VEL = Velocidad de transporte de las parrillas,  $\text{m} / \text{hr}$
- W = Ancho de la cámara de combustión, m

### Parte 3.4

- D1 = Diámetro del horno rotatorio, m
- L = Longitud del horno rotatorio, m
- rpm = Revoluciones por minuto
- a = Inclinación del horno,  $\text{cm/m}$  de longitud.
- c = Tiempo de residencia, minutos
- V = Volumen de la cámara de combustión,  $\text{m}^3$

## A P E N D I C E 2

Peso del proceso ton/hr	Emisión máxima permitida Kg/hr
8.0	31.2
10.0	36.2
15.0	47.5
20.0	57.6
25.0	66.9
30.0	74.0
35.0	76.6
40.0	78.8
45.0	80.8
50.0	82.6
60.0	85.7
70.0	87.4
80.0	90.8
100.0	94.9
500.0	127.3
1000.0	143.0
3000.0	172.7

**Tabla A.1 Emisión máxima permitida de polvos en relación a la capacidad del proceso de incineración ( México, S E D U E )**

Volumen de gas en la fuente (m <sup>3</sup> )	Concentración en el efluente (mg/ m <sup>3</sup> )
100	1132.0
125	1060.0
150	1000.0
175	952.0
200	912.0
300	800.0
400	724.0
500	680.0
750	592.0
1000	540.0

**Tabla A.2 Concentración máxima permitida de polvos en el efluente según la capacidad del incinerador. ( México, S E D U E )**

### A P E N D I C E 3

Ecuación 3.36 (explicación)

Kcal/KgAlim

$$\text{Poder calorífico del desecho} = \frac{NHV}{1 + n_f}$$

Kcal/KgAlim

$$\text{Poder calorífico comb. auxiliar} = \frac{n_f NHV}{1 + n_f}$$

$$\begin{aligned} \text{Entalpía del aire de combustión} &= C_{p \text{ aire}} (T_2 - T_1) \frac{4.31 \text{ Kg Aire}}{\text{Kg } O_2} \text{ Kg } O_2 - \\ &1.12(O_2)_{\text{esteq}(k)} (T_{\text{air}} - 25) \left(1 + \frac{EA}{100}\right) \end{aligned}$$

Kcal/KgAlim

$$\text{Entalpía de los gases de comb.} = \left[ 0.26(CO_{2k} + N_{2k}) + 0.49(H_2O_{kp}) + 1.12(O_2)_{\text{esteq}(k)} \left(\frac{EA}{100}\right) \right] (T - 25)$$

Kcal/KgAlim

$$\text{Pérdidas de calor} = 0.05 \left( \frac{NHV}{1 + n_f} + \frac{n_f NHV}{1 + n_f} \right)$$

Se considera 5% del total de poder calorífico de los materiales como pérdidas de calor, para fines de simplificación. (1)

Al reagrupar los términos según el balance de energía de la página 79 llegamos finalmente a la ecuación 3.36.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- T. Sonner & B. Desai. "Hazardous Waste Incineration Engineering". 1<sup>a</sup> Ed.   
Moyes Data Corporation. 1981
- 2.- W. R. Niessen. "Combustion and Incinerator Processes". 1<sup>a</sup> Ed.   
Marcel Dekker, Inc. 1978
- 3.- C. R. Brunner. "Incinerator Systems. Selection and Design". 1<sup>a</sup> Ed.   
Van Nostrand Reinhold Company. 1984
- 4.- W. M. Vataavuk & R. B. Neveril. "Estimate the size and cost of incinerators".   
Chemical Engineering. Julio 12. 1982. pag 129 - 132
- 5.- E. S. Monroe, Jr. "Combustion fundamentals: an approach to the design of   
industrial incinerators". Documento ASME 72-WA/IW-1
- 6.- W. Hudson & K.C. Lee. "Design and operate waste incinerators".   
Hydrocarbon processing. Octubre 1984. pag 47 - 49
- 7.- D. A. Hitchcock. "Solid-waste disposal: incinerator". Chemical Engineering.   
Mayo 21. 1979. pag 185 - 194
- 8.- K. S. Dunn. "Incineration's role in ultimate disposal of process wastes".   
Chemical Engineering. Octubre 6. 1975. pag 141 - 150
- 9.- C. R. Lewis & R. E. Edwards. "Incineration of industrial wastes".   
Chemical Engineering. Agosto 13. 1979. pag 120 - 134
- 10.- P. N. Chermisinoff. "Incineration of solid waste". Pollution Engineering.   
Junio 1975. pag 20 - 27
- 11.- C. O. Velsy. "The enigma of incinerator design". Documento ASME   
68-WA/INC-3
- 12.- R. H. Essenhigh & T. J. Kuo. "Development of physical and mathematical models   
of incinerators, Part I & II". Proceedings of 1970 National Incinerator Conference, ASME, N. Y. 1970. pag 261 - 271 y 327 - 330



- 13.- W. T. Clark. "Mathematical analyses of gas flow patterns in municipal incinerator furnace configurations". Proceedings of 1976 Waste Processing Conference, ASME, N. Y. 1976. pag 577 - 585
- 14.- R. H. Essenhigh. "Burning rates in incinerators, Part I & II". Proceedings of 1968 National Incinerator Conference, ASME, N. Y. 1968. pag 87 - 100
- 15.- J. B. Howard. "Combustion of solid refuse". Documento ASME 68-WA/INC-2
- 16.- G. Stabenow. "Performance and design data for large european refuse incinerators with heat recovery". Proceedings of 1970 National Incinerator Conference, ASME, N. Y. 1970. pag 278 - 286
- 17.- E. S. Domalski. "Thermodynamic data for incinerator engineering". Documento ASME 72-WA/IW-2
- 18.- R. Baillie & B. Crocker. Encyclopedia of Chemical Technology. "Incinerators". Kirk-Othmer. Vol-13. pag 182 - 206
- 19.- E. R. Kaiser. "Combustion & Heat calculations for incinerators". proceedings of 1964 National Incinerator Conference, ASME, N. Y. 1964. pag 81 - 89
- 20.- D. Schwartz. "Lexicon of incinerator terminology". Proceedings of 1964 National Incinerator Conference, ASME, N. Y. 1964. pag 20 - 31
- 21.- W. M. Vatauvuk. "Gaseous emissions control". Chemical Engineering. Abril 30. 1984. pag 95 - 98
- 22.- E. V. Jackson. "Factors to consider in designing incinerators". Consulting Engineer. Septiembre 1974. pag 78 - 79
- 23.- F. L. Heaney. "Choosing the right incinerator". Civil Engineering. Septiembre 1958. pag 44 - 46
- 24.- J. D. Brady. "Sensible and latent heat recovery from hazardous waste incinerator". Air pollution control asociation. Junio 1984. pag 24 - 29
- 25.- R. E. Kenson. "Rotary kiln incinerators for sludge disposal". Pollution Engineering. Diciembre 1981. pag 44 - 45

- 26.- W. Ellison. "Control of air and water pollution from municipal incinerators with the wet-approach venturi scrubber". Combustion. Agosto. 1971. pag 29-35
- 27.- E.R. Kaiser "Refuse composition and flue-gas analyses from municipal incinerators". Proceedings of 1964 National Incinerator Conference, ASME, N.Y. 1964. pag 35 - 51
- 28.- E. R. Kaiser. "Chemical analyses of refuse components". Proceedings of 1966 National Incinerator Conference, ASME. N. Y. 1966. pag 84 - 88
- 29.- D. Csathy "Design of waste-heat boilers". The Chemical Engineer. Abril 1981. pag 159 - 161
- 30.- D. T. Skizis "Gaseous emission control is vital". Solid Wastes Management. Abril 1982. pag 28 - 30
- 31.- M. Rayman "Design of a refuse incineration plant for the city of Coventry". Jnl. Instn. Municipal Engrs. Vol. 100, Septiembre 1973. pag 244 - 252
- 32.- T. C. Heil. "Design and operation of the east New Orleans incinerator plant". Public Works. Agosto 1971. pag 60 - 63
- 33.- M. Dvirka "Practical application of incinerator burning rate equations". Proceedings of 1976 National Waste processing Conference, ASME. N. Y. 1976. pag 549 - 566
- 34.- F. W. Kalika "The effects of variations in municipal refuse on some incinerator design parameters". Journal of engineering for power. Abril 1968. pag 205 - 212
- 35.- U. Westergaard "Types of mechanical grates for incinerators". Publicación ASME 62-WA-259
- 36.- J. D. Stickley "Instrumentation systems for municipal refuse incinerators". Proceedings of 1970 National Incinerator Conference, ASME. 1970. pag 65 - 80
- 37.- W. C. Achinger & L. E. Daniels "An evaluation of seven incinerators". Proceedings of 1970 National Incinerator Conference, ASME. 1970. pag 32 - 64

38.- R. J. Schoenberger "Classification of incinerator residue". Proceedings of 1970 National Incinerator Conference, ASME. 1970. pag 237 - 241