



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS

Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

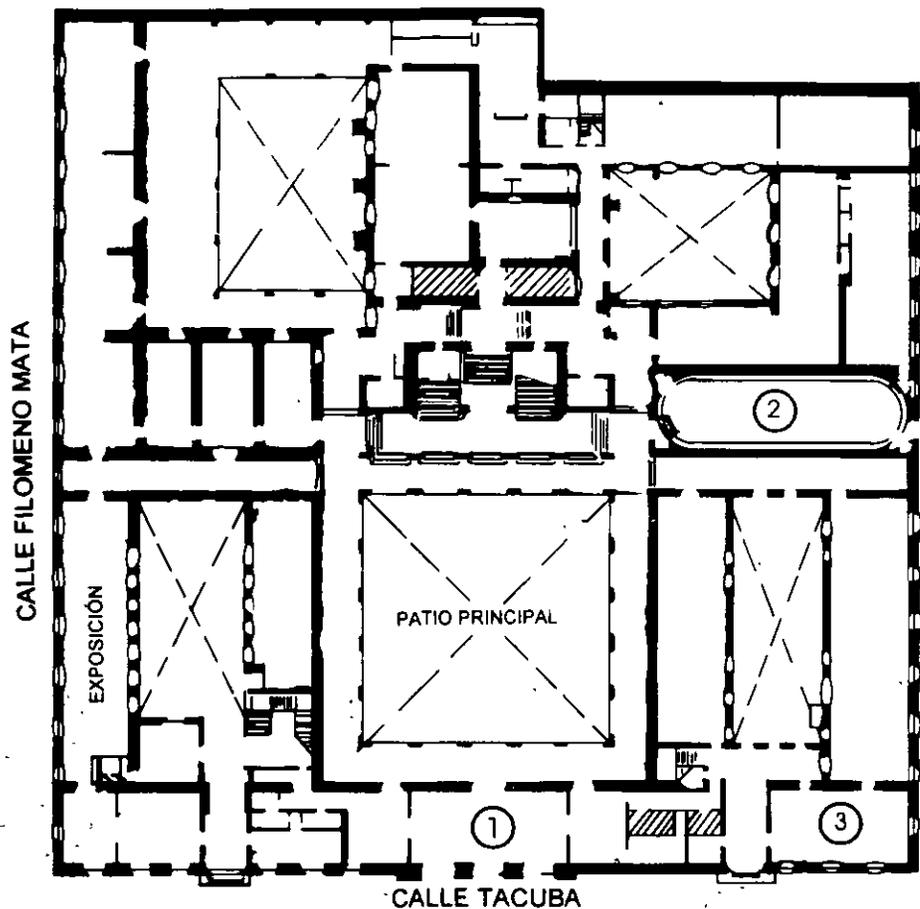
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

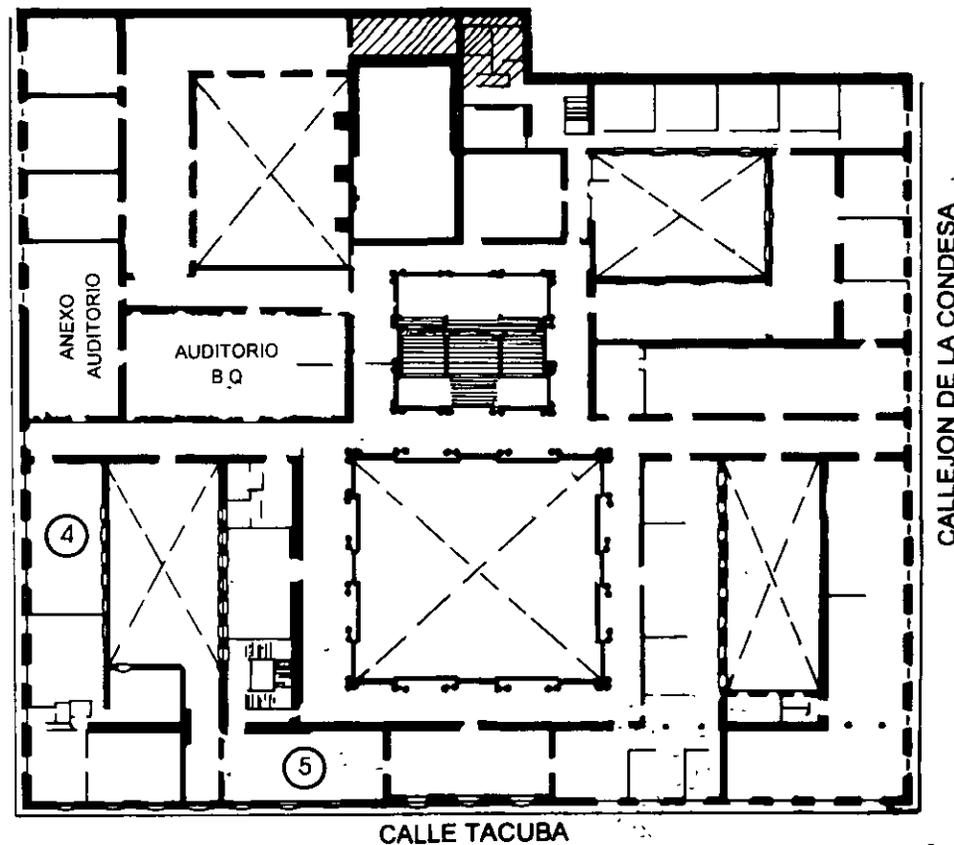
**Atentamente
División de Educación Continua.**



PALACIO DE MINERIA

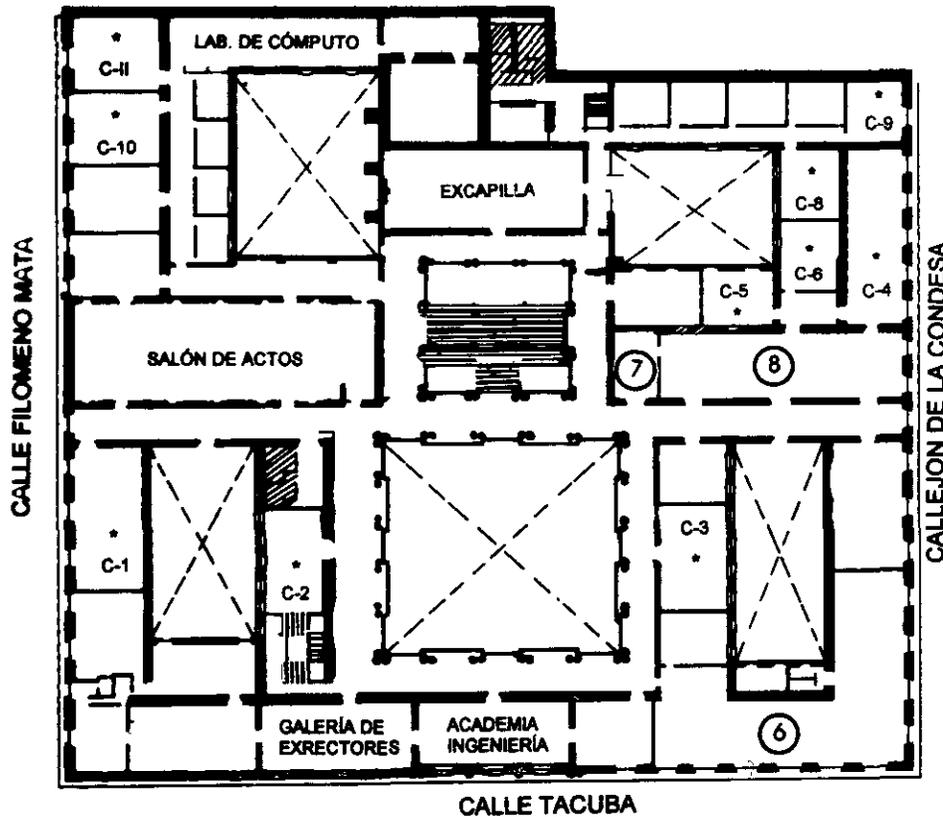


PLANTA BAJA



MEZZANINNE

PALACIO DE MINERÍA



GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
3. LIBRERÍA UNAM
4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
6. OFICINAS GENERALES
7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
8. SALA DE DESCANSO

SANITARIOS

* AULAS

1er. PISO



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.
CURSOS ABIERTOS

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA







**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS INSTITUCIONALES

**SECRETARIA DE OBRAS Y SERVICIOS URBANOS
GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL**

**INCINERACIÓN Y CREMACIÓN DE RESIDUOS.
Del 21 al 25 de Agosto del 2000.**

APUNTES GENERALES

Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez
Gobierno del Distrito Federal
Agosto/2000

INCINERACIÓN Y CREMACIÓN DE RESIDUOS

Del 21 al 25 de Agosto

1. PRINCIPIOS DE INCINERACIÓN
2. EL PROCESAMIENTO TÉRMICO
3. SISTEMAS DE INCINERACIÓN
4. SISTEMAS DE PIRÓLISIS
5. SISTEMAS DE GASIFICACIÓN
6. SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL
7. SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez

INCINERACIÓN Y CREMACIÓN DE RESIDUOS

El procesamiento térmico de los residuos sólidos, utilizado para la reducción en volumen y la recuperación de energía, es un elemento importante en muchos sistemas de gestión integral de residuos sólidos.

Comprender la función del procesamiento térmico dentro de un sistema de gestión integral de residuos sólidos es esencial para elegir el equipo y establecer normas de rendimiento. Por tanto, el enfoque de este trabajo se centra en los fundamentos de análisis del sistema y no sobre los detalles de diseño. El trabajo se organiza en las siguientes secciones:

- Principios de la incineración
- El procesamiento térmico
- Sistemas de incineración
- Sistemas de pirólisis
- Sistemas de gasificación
- Sistemas de control ambiental
- Sistemas de recuperación de energía

1. PRINCIPIOS DE INCINERACIÓN

Descripción de procesos de incineración

Las operaciones básicas implicadas en la incineración de RSU no seleccionados se ven en la Figura 1. La operación comienza con la descarga de residuos sólidos desde vehículos de recolección (1) en un foso de almacenamiento (2). La anchura de la plataforma de descarga y del foso de almacenamiento está en función del tamaño de la instalación y del número de camiones que deben descargarse simultáneamente. La profundidad y la anchura del foso de almacenamiento se determinan por la tasa de recepción de carga de residuos y la de incineración. La

capacidad del foso de almacenamiento es normalmente equivalente al volumen de residuos por lotes en el conducto de alimentación (de carga) (4), que dirige los residuos al horno (5). El operador de la grúa puede seleccionar la mezcla de residuos para conseguir un contenido de humedad más o menos homogéneo en la alimentación. También se separan de los residuos los artículos grandes y no combustibles con la grúa puente. Los residuos sólidos en el conducto de alimentación (de carga) caen en las parrillas (6), donde son quemados en bruto. Normalmente se utilizan varios tipos distintos de alimentadores mecánicos.

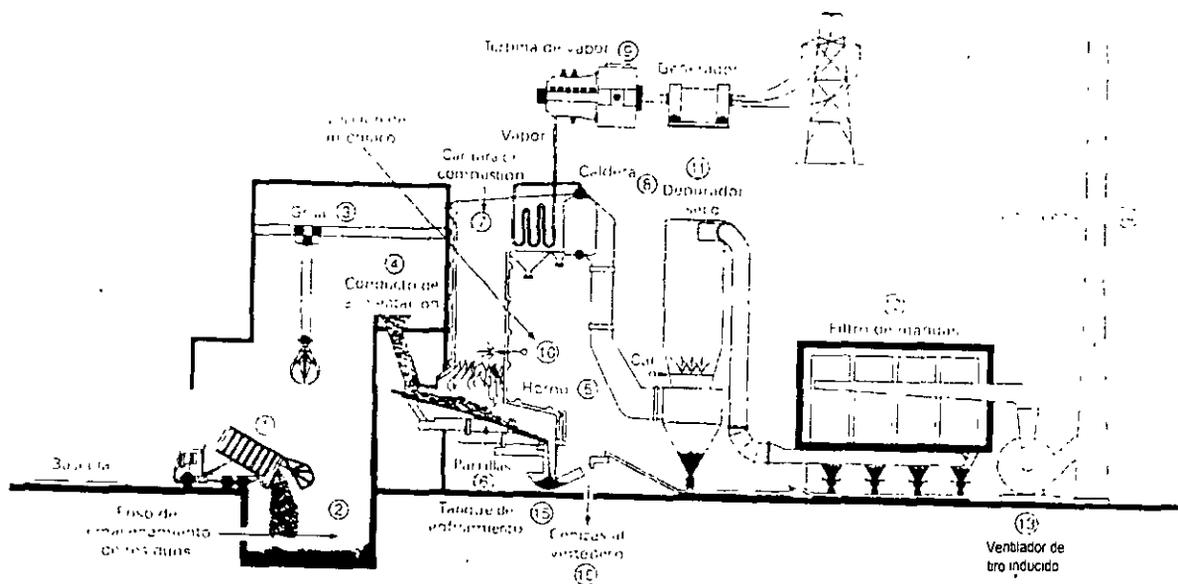


FIG. 1. SECCIÓN DE UNA INCINERADORA MUNICIPAL DE ALIMENTACIÓN CONTINUA Y DE QUEMADO EN BRUTO TÍPICA UTILIZADA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RSU.

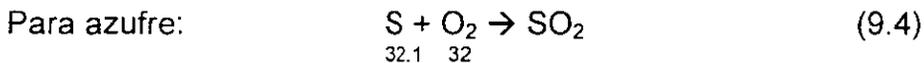
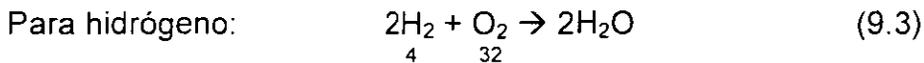
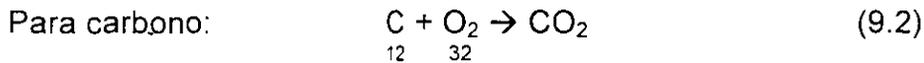
Se puede introducir aire desde el fondo de las parrillas (aire primario) mediante un ventilador de aire forzado o desde la parte superior de las parrillas (aire secundario), para controlar la velocidad de incineración y la temperatura del horno. Como la mayoría de los residuos orgánicos son térmicamente inestables, se emiten varios gases desde el horno durante el proceso de combustión. Estos gases y pequeñas partículas orgánicas suben a la cámara de combustión (7), y se queman a temperaturas superiores a 870°C (1.600°F). Se recupera el calor de los gases calientes utilizando tubos llenos de agua en las paredes de la cámara de combustión y con una caldera (8) que produce vapor, que se convierte en electricidad mediante un generador de turbina (9).

El equipamiento de control de contaminación del aire puede incluir la inyección de amoníaco para controlar NO_x (óxidos de nitrógeno) (10), una depuradora seca para controlar SO₂ y los gases ácidos (11), y un filtro de mangas para separar partículas (12). Para asegurar flujos de aire adecuados que compensen las pérdidas en el tiro causadas por el equipamiento de control de contaminación del aire, así como para suministrar aire a la misma incineradora, puede ser necesario un ventilador de tiro inducido (13). Los productos finales de incineración son gases calientes de combustión y cenizas. Los gases limpios y se conducen a la chimenea (14) para su dispersión atmosférica. Las cenizas y rechazos no quemados caen desde las parrillas en una tolva de rechazos (15) localizada debajo de las parrillas, donde son tratados con agua. Las cenizas volantes procedentes del filtro de mangas y de la depuradora seca se mezclan con las cenizas del horno y se transportan a instalaciones para tratamiento de cenizas (16).

Productos de incineración

Los elementos principales de los residuos sólidos son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. También se encontrarán pequeñas cantidades de otros elementos en la ceniza. Bajo condiciones ideales, los productos gaseosos derivados de la incineración de RSU con cantidades estequiométricas de aire

incluirían dióxido de carbono (CO₂) agua (H₂O), nitrógeno (N₂) y pequeñas cantidades de dióxido de azufre (SO₂). En realidad son posibles muchas secuencias de reacción, según la naturaleza exacta de los residuos y las características operacionales del reactor de combustión. Las reacciones básicas para la oxidación (combustión) de carbono, hidrógeno y azufre (y sus masas atómicas) contenidas en la fracción orgánica de los RSU son las siguientes:

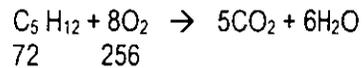


Si se considera que el aire seco contiene un 23,15 por 100 de oxígeno en peso, entonces la cantidad de aire necesario para la oxidación de 453 g de carbono sería igual a 5,222 kg [(32/12) (1/0,2315)]. Las cantidades correspondientes para hidrógeno y azufre son 15,655 kg y 1,955 kg, respectivamente. El cálculo de la cantidad de aire necesaria para la incineración completa de residuos orgánicos se ilustra en el Ejemplo 1.

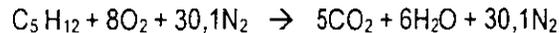
Ejemplo 1. Determinación de la cantidad estequiométrica de aire necesaria para la combustión de residuos sólidos orgánicos. Determinar la cantidad (kg y m³) de aire necesario para la incineración completa de una tonelada de residuos sólidos orgánicos. Suponer que la composición de los residuos orgánicos que se van a incinerar es C₅H₁₂. Suponer que el peso específico del aire es 1,2 kg/m³.

Solución

1. Escribir una ecuación estequiométrica equilibrada para la oxidación del compuesto orgánico basándose en el oxígeno:



2. Escribir una ecuación equilibrada para la oxidación del compuesto orgánico con el aire. En los cálculos de combustión, el aire seco se supone que está compuesto del 21 por 100 oxígeno y 79 por 100 nitrógeno. Por lo tanto, la reacción correspondiente a aquella dada en el paso 1 para el aire es:



3. Determinar la cantidad de aire necesario para la incineración, suponiendo que el aire contiene el 23 por 100 de oxígeno en peso.

$$\text{O}_2 \text{ necesario} = \frac{256}{72} \cdot (1.000 \text{ kg/t}) = 3.556 \text{ kg/t}$$

$$\text{Aire necesario} = \frac{3.556 \text{ kg/t}}{0,2315} = 15.361 \text{ kg/t}$$

4. La cantidad de aire necesario para la combustión también puede calcularse utilizando los factores anteriormente dados.

$$\text{Aire necesario para el carbono, C} = \frac{60}{72} \cdot (1.000 \text{ kg/t}) \cdot 11,52 = 9.600 \text{ kg/t}$$

$$\text{Aire necesario para el hidrógeno, H} = \frac{12}{72} \cdot (1.000 \text{ kg/t}) \cdot 34,56 = 5.760 \text{ kg/t}$$

$$\text{Total del aire necesario} = 9.600 + 5.760 = 15.360 \text{ kg/t}$$

5. Determinar el volumen del aire necesario para la incineración.

$$\text{Volumen de aire} = (15.361 \text{ kg/t}) / (1,2 \text{ kg/m}^3) = 12.801 \text{ m}^3/\text{t}$$

Comentario. En el paso 2, el nitrógeno se mantiene en los dos lados de la ecuación porque no entra en la reacción. Aunque en este ejemplo se suponía la incineración completa con fines de ilustrar los cálculos implicados en cálculos estequiométricos, casi nunca se consigue la incineración completa en la práctica. Normalmente, del 3 al 5 por 100 de la materia orgánica en la alimentación de entrada se encontraría en las cenizas procedentes de una incineradora.

Tipos de incineradora

Las incineradoras de residuos sólidos se pueden diseñar para operar con dos tipos de residuos sólidos como combustible: RSU en bruto o en masa no seleccionados (incineración en masa) y RSU procesados, conocidos como combustible derivado de residuos (CDR). Las incineradoras en masa son el tipo predominante. En 1987, el 68 por 100 de la capacidad operacional de las incineradoras en Estados Unidos fue proporcionado con unidades de incineración en masa y el 23 por 100 con unidades de quemado CDR. El 9 por 100 restante de la capacidad fue proporcionado con unidades de incineración modular de incineración en masa.

Incineradoras de combustión en masa. En una incineradora de combustión en masa (ver figura 2), se da un procesamiento mínimo a los residuos sólidos antes de colocarlos en la tolva de alimentación de la incineradora. El operador de la grúa encargado de cargar la alimentadora puede rechazar artículos claramente no aptos. Sin embargo, se debe suponer que cualquier objeto dentro del flujo de RSU puede entrar finalmente en la incineradora, incluyendo objetos voluminosos no combustibles (por ejemplo, triciclos rotos, etc.), incluso residuos potencialmente peligrosos entregados en el sistema, bien a propósito o descuidadamente. Por estas razones, la incineradora se debe diseñar para manipular estos residuos rechazables sin causar daños al equipamiento o personal. El contenido energético de los residuos quemados en bruto puede ser extremadamente variable, según el clima, la estación del año y el origen de los residuos. A pesar de estas desventajas potenciales, las incineradoras de combustión en masa han llegado a ser la tecnología elegida para la mayoría de las incineradoras existentes y planeadas.

Incineradoras alimentadas por CDR. Comparándolo con la naturaleza incontrolada de los RSU no seleccionados y no procesados, el CDR puede producirse a partir de la fracción orgánica de los RSU, con una consistencia bastante buena como para cumplir las especificaciones de contenido energético, humedad y contenido de cenizas. Se puede producir CDR en forma triturada o

fibrosa, o en formas cilíndricas o cúbicas densificadas. El CDR densificado (CDRd) es más costoso de producir, pero es más fácil de transportar y almacenar. Se pueden quemar las dos formas solas o mezcladas con carbón.

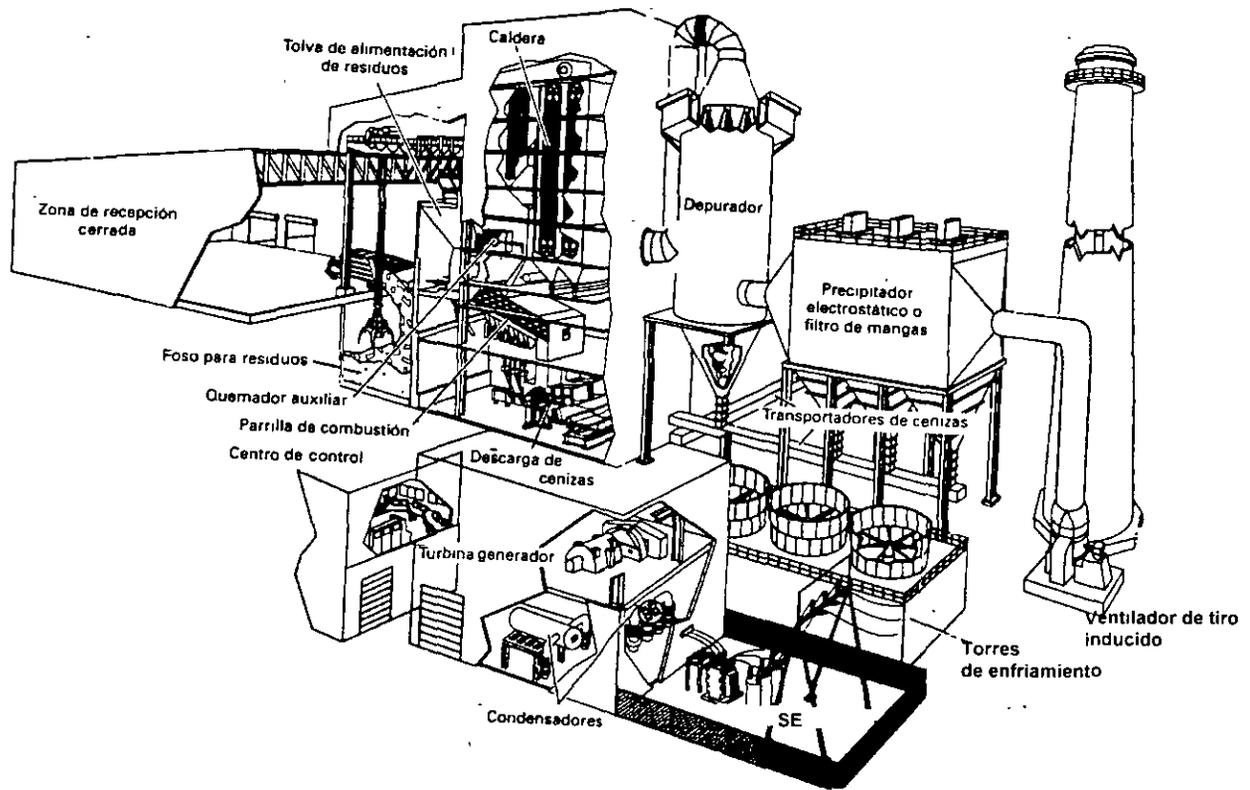


FIG. 2. SECCIÓN DE INCINERADORA ALIMENTADA POR RSU EN BRUTO, UTILIZADA PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RSU.

Por el contenido energético más alto del CDR comparándolo con los RSU no procesados, los sistemas de incineración de CDR (ver figura 3) pueden ser físicamente más pequeños que los sistemas comparablemente equivalentes de RSU quemados en bruto. Sin embargo, se necesitará más espacio si el sistema de procesamiento, necesario para preparar CDR, se va a localizar al lado de la incineradora. Un sistema alimentado por CDR, también se puede controlar más eficientemente que un sistema de incineración en masa, por la naturaleza más homogénea del CDR, que permite un mejor control de la combustión y un mejor rendimiento de los dispositivos de control de contaminación del aire. Adicionalmente, un sistema correctamente diseñado para el preprocesamiento de los RSU puede lograr la separación de porciones importantes de metales, plásticos y otros materiales que puedan contribuir a emisiones aéreas nocivas.

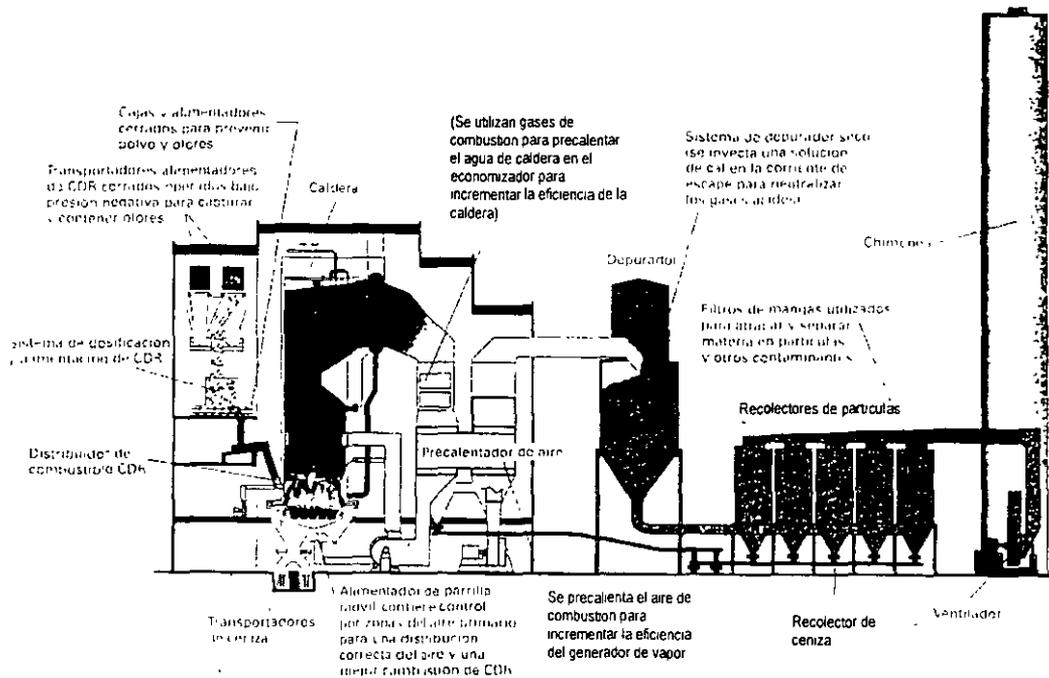


FIG. 3. VISTA DE UN SISTEMA DE INCINERACIÓN CON CALDERA UTILIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS PROCESADOS, GAS NATURAL, ACEITE Y CARBÓN

Recuperación de energía

Virtualmente todas las nuevas incineradoras actualmente en construcción en Estados Unidos y Europa emplean alguna forma de recuperación de energía para ayudar a recuperar los costos de operación, y reducir los costos de financiamiento del equipamiento para controlar la contaminación del aire. La energía puede recuperarse de los gases calientes de chimenea generados por la incineración de RSU procesados, de combustible sólido en forma cilíndrica (por ejemplo, CDR), o de RSU no procesados, mediante dos métodos:

- Uso de una cámara de incineración de pantalla de agua
- El uso de calderas de calor procedente de residuos, o ambos.

Se puede generar agua caliente o vapor. El agua caliente puede utilizarse para aplicaciones industriales o para calefacción central de baja temperatura. El vapor es más versátil, porque se puede utilizar para calefacción y para generación de electricidad. Quizás el diagrama de flujo más común para la producción de energía eléctrica utilizando vapor implica el uso de una combinación generador-turbina de vapor, como se muestra en la Figura 4.

Reducción en volumen

Entre los factores que se deben considerar en la valoración de los procesos de incineración de RSU está la cantidad de rechazos que quedan después de la incineración y si se necesitará combustible auxiliar cuando la recuperación de calor no sea de importancia primaria.

La cantidad de rechazos depende de la naturaleza de los residuos incinerados. En la Tabla 1 se presentan datos representativos sobre los rechazos procedentes de varios componentes de residuos sólidos. Los cálculos necesarios para valorar la cantidad y la composición de los rechazos después de la incineración se ilustran en el ejemplo 2.

Vapor de residuos sólidos triturados o clasificados, o pellets de combustible quemado directamente en la caldera, o de residuos sólidos quemados en bruto en una caldera de pared de agua. En las unidades de incineración en bruto quizás sea necesario un combustible auxiliar.

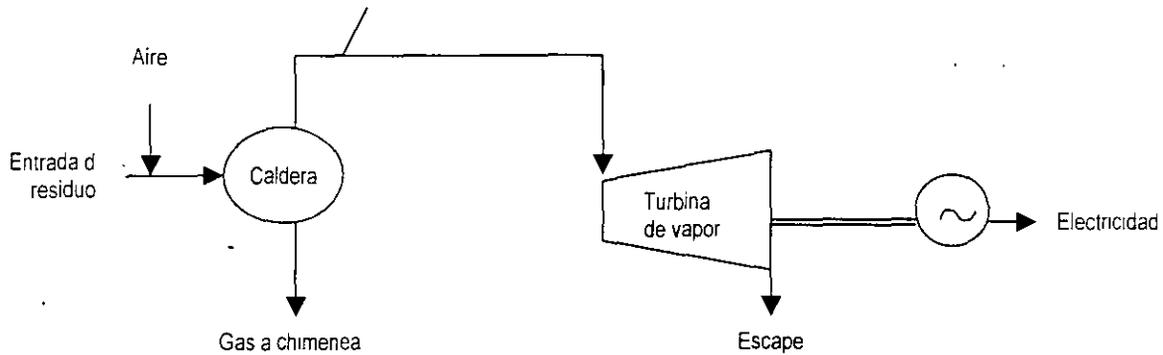


FIG. 4. ESQUEMA DE UN SISTEMA PARA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA UTILIZANDO UNA COMBINACIÓN GENERADOR-TURBINA DE VAPOR.

TABLA 1
COMPOSICIÓN DEL RECHAZO DE LA INCINERACIÓN DE RSU NO SELECCIONADOS

Componente	Porcentaje en peso	
	Rango	Típico
Materia orgánica parcialmente quemada o no quemada	3-10	5
Lata de hojalata	20-25	18
Otro hierro y acero	6-15	10
Otros metales	1-4	2
Vidrio	30-50	35
Cerámicas, piedras, ladrillos	2-8	5
Cenizas	10-35	25
TOTAL		100

Ejemplo 2. Determinación de la reducción en volumen y del volumen de los rechazos después de la incineración. Determinar la cantidad y la composición de los rechazos procedentes de una incineradora utilizada para residuos sólidos urbanos de composición media. Estimar la reducción en volumen de los residuos si se supone que el peso específico de los rechazos es de 593 kg/m^3 .

Solución

1. Construir una tabla de cálculos para determinar la cantidad de rechazos y su distribución porcentual por peso. A continuación se presenta la tabla de cálculos completada:

Componente	Residuos sólidos, kg	Rechazo inerte, porcentaje	Rechazo	
			kg	Porcentaje
Orgánico				
Residuos de comida	90	5	4,5	1,9
Papel	340	6	20,4	8,6
Cartón	60	5	3,0	1,3
Plásticos	70	10	7,0	2,9
Textiles	20	6,5	1,3	0,5
Goma	5	9,9	0,5	0,2
Cuero	5	9,0	0,5	0,2
Residuos de jardín	185	4,5	8,3	3,5
Madera	20	1,5	0,3	0,1
Orgánicos misceláneos	---	---	---	---
Inorgánico				
Vidrio	80	98	78,4	33,0
Latas de hojalata	60	98	58,8	24,7
Aluminio	5	96	4,8	2,0
Otros metales	30	98	29,4	12,4
Suciedad, cenizas, etc.	30	68	20,4	8,6
TOTAL	1.000		237,6	100

2. Estimar los volúmenes originales y finales antes y después de la incineración. Para estimar el volumen inicial estimado suponer que el peso específico medio de los residuos sólidos en el pozo de almacenamiento de la incineradora es aproximadamente 222 kg/m^3 .

$$\text{Volumen original} = \frac{1.000 \text{ kg}}{222 \text{ kg/m}^3} = 5 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de rechazos} = \frac{237,5 \text{ kg}}{593 \text{ kg/m}^3} = 0,4 \text{ m}^3$$

3. Estimar la reducción en volumen utilizando la ecuación (4.1).

$$\text{Reducción en volumen} = \frac{5 - 0,4}{5} \cdot 100 = 92 \text{ por } 100$$

Cuestiones sobre las plantas de incineración

Las principales cuestiones asociadas con el uso de incineradoras para la transformación de RSU están relacionadas con:

- La localización
- Las emisiones a la atmósfera
- La evacuación de rechazos
- Las emisiones líquidas
- La economía

Si no se resuelven las preguntas relacionadas con estas cuestiones importantes, el uso de la incineración puede tener un futuro incierto. A continuación se presentan estos temas y se examinan en detalle posteriormente.

Localización. Como en la localización de IRM, ha sido posible construir y operar plantas de incineración próximas a zonas residenciales e industriales; sin embargo, hay que tener cuidado en su operación, determinando si van a ser ambiental y estéticamente aceptables. Idealmente para minimizar el impacto de la operación de plantas de incineración, éstas deberían localizarse en zonas más aisladas, donde se puedan mantener zonas adecuadas de seguridad alrededor de la instalación. En muchas comunidades, las incineradoras están localizadas en lugares remotos, dentro de los límites de la ciudad o en la zona de vertedero.

Emisiones a la atmósfera. La operación de plantas de incineración provoca la producción de diversas emisiones gaseosas y partículas, muchas de las cuales se piensa que pueden tener graves impactos sobre la salud. La capacidad demostrada de las instalaciones y del equipamiento de la planta de incineración para controlar eficazmente las emisiones gaseosas y en partículas es de una importancia fundamental en la localización de estas instalaciones. El diseño correcto de sistemas para el control de estas emisiones es una parte crítica del diseño de sistemas de incineración. En algunos casos, el costo y la complejidad

de los sistemas de control ambiental son iguales o incluso mayores que el costo de la planta de incineración.

Evacuación de rechazos. Las plantas de incineración producen varios rechazos sólidos, incluyendo:

- Cenizas de fondo
- Cenizas volantes
- Productos de depuración

La gestión de estos residuos sólidos es una parte integral del diseño y la operación de una planta de incineración. Normalmente la ceniza de fondo se evacua mediante descarga. La principal preocupación con el vertido de cenizas es que puede, bajo ciertas condiciones, lixiviar contaminantes en el agua subterránea. En consecuencia, actualmente se evacuan las cenizas procedentes de incineradoras en vertederos de RSU o en monovertederos doblemente recubiertos destinados únicamente a la evacuación de cenizas.

Emisiones líquidas. Las emisiones líquidas procedentes de las plantas de incineración pueden surgir de una o más de las siguientes fuentes:

- Aguas residuales de instalaciones para separación de cenizas
- Efluente procedente de depuración por vía húmeda
- Aguas residuales de sellado de bombas, de limpieza, de baldeo, y de actividades de mantenimiento en general
- Aguas residuales procedentes de los sistemas de tratamiento utilizados para producir agua de caldera de alta calidad
- Purgas de torres de enfriamiento.

La manipulación y evacuación correctas de estas emisiones líquidas también es una parte importante en el diseño de las plantas de incineración.

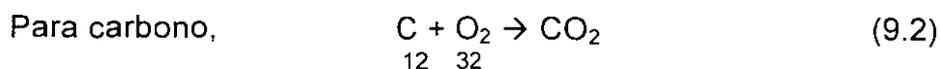
Economía. Las cuestiones económicas para un sistema de incineración propuesto deben evaluarse cuidadosamente, con el fin de permitir una elección entre sistemas alternativos. La mejor forma de comparar sistemas alternativos es mediante el cálculo del costo del ciclo de vida, que tiene en cuenta los costos de operación y mantenimiento durante la vida del sistema. La industria de residuos sólidos ha desarrollado un acercamiento estandarizado para calcular el costo del ciclo de vida mediante el uso de una declaración por forma de ingresos.

2. EL PROCESAMIENTO TÉRMICO

El procesamiento térmico de los residuos sólidos puede definirse como la conversión de los residuos sólidos en productos de conversión gaseosos, líquidos y sólidos, con la simultánea o subsiguiente emisión de energía en forma de calor. Los sistemas de procesamiento térmico pueden clasificarse en base a sus requisitos de oxígeno (ver Figura 5). La combustión con la cantidad de oxígeno exactamente necesaria para la combustión total se conoce como combustión estequiométrica. La combustión con oxígeno en exceso sobre las necesidades estequiométricas se denomina combustión con exceso de aire. La gasificación es la combustión parcial de los residuos sólidos bajo condiciones subestequiométricas para generar un gas combustible que contiene monóxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos gaseosos. La pirólisis es el procesamiento térmico de residuos en ausencia completa de oxígeno. En las secciones siguientes se argumentan más detalladamente la gasificación y la pirólisis.

Combustión estequiométrica

Las reacciones básicas para la combustión estequiométrica del carbono, hidrógeno, y azufre en la fracción orgánica de los RSU son las siguientes:



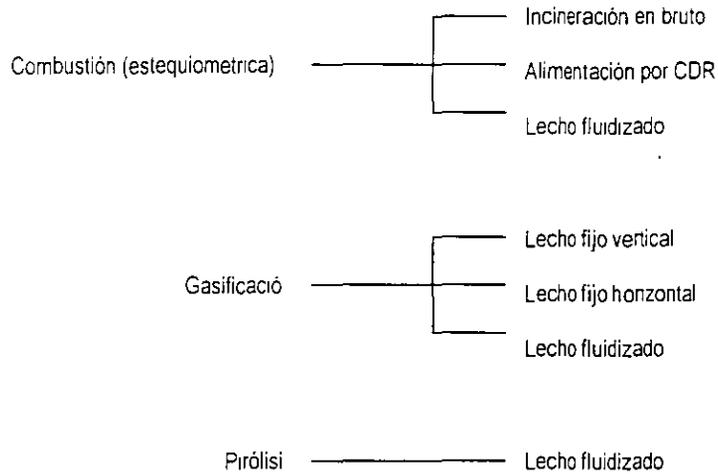
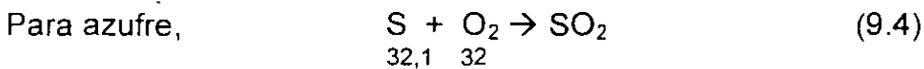
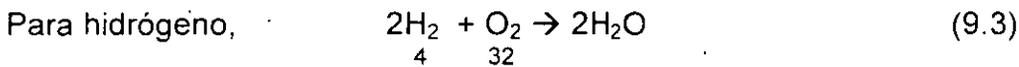


FIG. 5. SISTEMAS REPRESENTATIVOS DEL PROCESAMIENTO TÉRMICO



Si se considera que el aire seco contiene un 23,15 por 100 de oxígeno por peso, entonces la cantidad de aire requerida para la oxidación de 1 kg de carbono sería igual a 11,52 kg $[(32/12) (1/0,2315)]$. Las cantidades correspondientes para hidrógeno y azufre son 34,56 y 4,31 kg, respectivamente. Hay que tener en cuenta que primero tiene que ser ajustada la cantidad de hidrógeno, mediante la sustracción de un octavo del porcentaje total de hidrógeno inicialmente presente en los residuos (esta sustracción tiene en cuenta el oxígeno de los residuos combinándose con el hidrógeno para formar agua).

Combustión con aire en exceso

Por la naturaleza heterogénea de los residuos sólidos, con cantidades estequiométricas de aire. En sistemas de incineración, en la práctica, se debe utilizar oxígeno adicional para aumentar la mezcla y las turbulencias, asegurando así que el aire pueda llegar a todas las partes de los residuos. El uso de aire en exceso en la incineración afecta a la temperatura y a la composición de los productos de combustión (conocidos como gases de chimenea). Mientras aumenta el porcentaje de aire en exceso, el contenido en oxígeno de los gases de chimenea también se incrementa y la temperatura de combustión disminuye; por lo tanto, el aire de la combustión puede usarse para controlar la temperatura de combustión. La temperatura de los gases de chimenea es importante desde el punto de vista de control de olores. Cuando las temperaturas de combustión son menores de 790°C, puede producirse la emisión de compuestos olorosos. También se ha comprobado que con temperaturas superiores a 980°C se minimiza la emisión de toxinas, furanos, compuestos volátiles (COV) y otros compuestos potencialmente peligrosos en los gases de chimenea.

Calor generado por la combustión

El calor emitido durante el proceso de combustión es parcialmente almacenado en los productos de combustión y parcialmente transferido por convección, conducción y radiación a las paredes del sistema de combustión, al combustible entrante y a los rechazos. Si se conoce la composición elemental de los residuos sólidos, se puede estimar el contenido energético utilizando la forma modificada de la ecuación de Dulong. A menudo, el contenido energético de los residuos sólidos se basa en un análisis del poder calorífico de los componentes individuales de los residuos. Los cálculos de combustión necesarios para estimar el calor disponible procedente del proceso de combustión, para su conversión en vapor y finalmente en energía eléctrica, son ilustrados en el Ejemplo 3.

Ejemplo 3. Balance de masas y de calor para la incineración de residuos sólidos. Determinar el calor disponible en los gases de salida procedentes de la incineración de 125 t/d de residuos sólidos con las siguientes características:

Componente	Porcentaje del total	Kg/d
Combustible	54,6	61,91
No combustible	24,0	27,21
Agua	21,4	24,26

Elemento	Porcentaje
Carbono	27,4
Hidrógeno	3,6
Oxígeno	23,0
Nitrógeno	0,5
Azufre	0,1
Agua	21,4
Inertes	24,0

Suponer que son aplicables las siguientes condiciones:

1. El valor calorífico de los residuos sólidos quemados es de 2.816 Kcal/kg.
2. El rechazo de la parrilla contiene un 5 por 100 de carbono no quemado.
3. Temperaturas:

Aire entrando, 27°C

Rechazos de parrilla, 427°C

4. Calor específico del rechazo = 0,249 Kcal/kg-°C.
5. Calor latente del agua = 578 kcal/kg.
6. Pérdida por radiación = 0,005 Kcal/Kcal del calor bruto de entrada.
7. Todo el oxígeno en los residuos está dentro del agua.
8. Requisitos teóricos de aire basándose en la estequiometría

Carbono: $(C + O_2 \rightarrow CO_2) = 11,52 \text{ kg/kg}$

Hidrógeno: $(2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O) = 34,56 \text{ kg/kg}$

Azufre: $(S + O_2 \rightarrow SO_2) = 4,31 \text{ kg/kg}$

9. El hidrógeno neto disponible para la incineración es igual al porcentaje de hidrógeno menos 1/8 del porcentaje de oxígeno. Esto explica el agua <<atrapada>> en el material combustible seco.
10. El poder calorífico del carbono es de 748 Kcal/kg.
11. La humedad en el aire de combustión es del 1 por 100.

Solución

1. Construir una tabla de cálculos para calcular los pesos de los elementos en los residuos sólidos.

	Elemento	Kg/d
Carbono	= 0,274 · 125.000 =	34.250
Hidrógeno	= 0,036 · 125.000 =	4.500
Oxígeno	= 0,230 · 125.000 =	28.750
Nitrógeno	= 0,005 · 125.000 =	620
Azufre	= 0,001 · 125.000 =	120
Agua	= 0,214 · 125.000 =	26.750
Inertes	= 0,240 · 125.000 =	30.000
Total		125.000

2. Calcular la cantidad del rechazo:

$$\text{Inertes} = 30.000 \text{ kg/d}$$

$$\text{Total de rechazos} = 30.000/0,95 = 31.580 \text{ kg/d}$$

$$\text{Carbono en el rechazo} = 1.580 \text{ kg/d}$$

3. Determinar el hidrógeno y el agua atrapada disponible:

$$\text{Hidrógeno neto disponible, porcentaje} = (3,6 - 23/8) = 0,725 \text{ por } 100 = 906,25 \text{ kg/d}$$

$$\text{Hidrógeno en el agua combinada} = 3,6 - 0,725 = 2,875 \text{ por } 100 = 3.593,75 \text{ kg/d}$$

$$\text{Agua combinada} = \text{oxígeno} + \text{hidrógeno en el agua combinada} =$$

$$28.750 + 3.593,75 = 32.343,75 \text{ kg/d}$$

4. Construir una tabla de cálculos para calcular el aire requerido.

Elemento	Requisitos de aire, kg/d
Carbono = $(34.250 - 1.580) \cdot 11,52$	376.358
Hidrógeno = $906,25 \cdot 34,56$	31.284
Azufre = $120 \cdot 4,31$	517
Total de aire teórico seco	408.159
Total de aire seco incluyendo 100 por 100 adicional	816.312 ^a
Humedad = $816.312 \cdot 0,01$	8 163
Total de aire	824.475

^a Kg de aire/kg de residuos sólidos = $408.159 \text{ kg de aire} / 125.000 \text{ de residuos sólidos} = 3,27$.

5. Determinar la cantidad de agua producida a partir de la combustión del hidrógeno disponible:

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{2 \text{ kg H}_2} \cdot 906,25 \text{ kg H}_2/\text{d} = 8.156 \text{ Kg/d}$$

6. Preparar un balance de calor para el proceso de combustión.

Item	Valor, 10 ⁶ .Kcal/d
Entrada de calor bruto = $125.000 \text{ kg/d} \cdot 2.816 \text{ Kcal/kg}$	352
Calor perdido en el carbono no quemado = $1.580 \cdot 7.770$	- 12,2
Pérdida de radiación = $0,005 \cdot 352$	- 1,7
Humedad inherente = $26.750 \cdot 578$	- 15,4
Humedad en el agua combinada = $32.344 \cdot 578$	- 18,7
Humedad a partir de la incineración del hidrógeno disponible = $8.156 \cdot 578$	- 4,7
Calor sensible en el rechazo = $31 580 \cdot 0,249 \cdot 400$	- 3,1
Total de pérdidas	55,8
Calor neto disponible en los gases de chimenea = $352 - 55,8 \cdot 10^6$	296,2
Eficiencia de la incineración = $296,2 \cdot 10^6 / 352 \cdot 10^6 \cdot 100 \text{ por } 100$	84,1 por 100

Comentario. Si la eficiencia de la caldera fuese de un 85 por 100, entonces la eficiencia global sería igual a la eficiencia de combustión multiplicada por la eficiencia de la caldera ($84,1 \text{ por } 100 \cdot 85 \text{ por } 100$), aproximadamente un 71,5 por 100. Este valor es compatible con los valores obtenidos en las incineradoras modernas de RSU.

3. SISTEMAS DE INCINERACIÓN

Incineración puede definirse como el procesamiento térmico de los residuos sólidos mediante oxidación química con cantidades estequiométricas o en exceso de oxígeno. Los productos finales incluyen gases calientes de combustión, compuestos principalmente de nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua (gas de chimenea), y rechazos no combustibles (ceniza). Se puede recuperar energía mediante el intercambio del calor procedente de los gases calientes de combustión.

Tipos de sistemas de incineración

Los sistemas de incineración de residuos sólidos pueden diseñarse para operar con dos tipos de combustible de residuos sólidos procesados en forma de combustible derivado de residuos (CDR quemado). El tipo predominante son los sistemas de incineración en bruto. En 1987, el 68 por 100 de la capacidad operacional de incineración en Estados Unidos fue proporcionado por unidades de combustión en bruto, frente al 23 por 100 alimentadas por CDR. El 9 por 100 restante de la capacidad se proporcionó con sistemas unitarios de incineración modular de combustión en bruto, tratados una sección más adelante.

Sistemas de incineración de combustión en bruto. En un sistema de incineración de quemado en bruto se da un procesamiento mínimo a los residuos antes de colocarlos en la tolva de alimentación del sistema (ver Figura 6). El operario de la grúa, responsable de cargar la tolva de alimentación, puede rechazar objetos claramente inservibles. Sin embargo, debe suponerse que cualquier cosa dentro del flujo de residuos sólidos pueden entrar finalmente en el sistema, incluyendo artículos voluminosos demasiado grandes y no combustibles (por ejemplo refrigeradores) e incluso residuos potencialmente peligrosos entregados al sistema a propósito o accidentalmente.

Por estas razones, el sistema debe diseñarse para manipular estos residuos incómodos sin causar daños al equipamiento o al personal operario. El contenido energético de los residuos quemados en bruto puede ser extremadamente variable, según el clima, la estación y el origen de los residuos. A pesar de estas desventajas potenciales, la incineración de quemado en bruto se ha convertido en la tecnología elegida por la mayoría de los sistemas existentes y en proyecto.

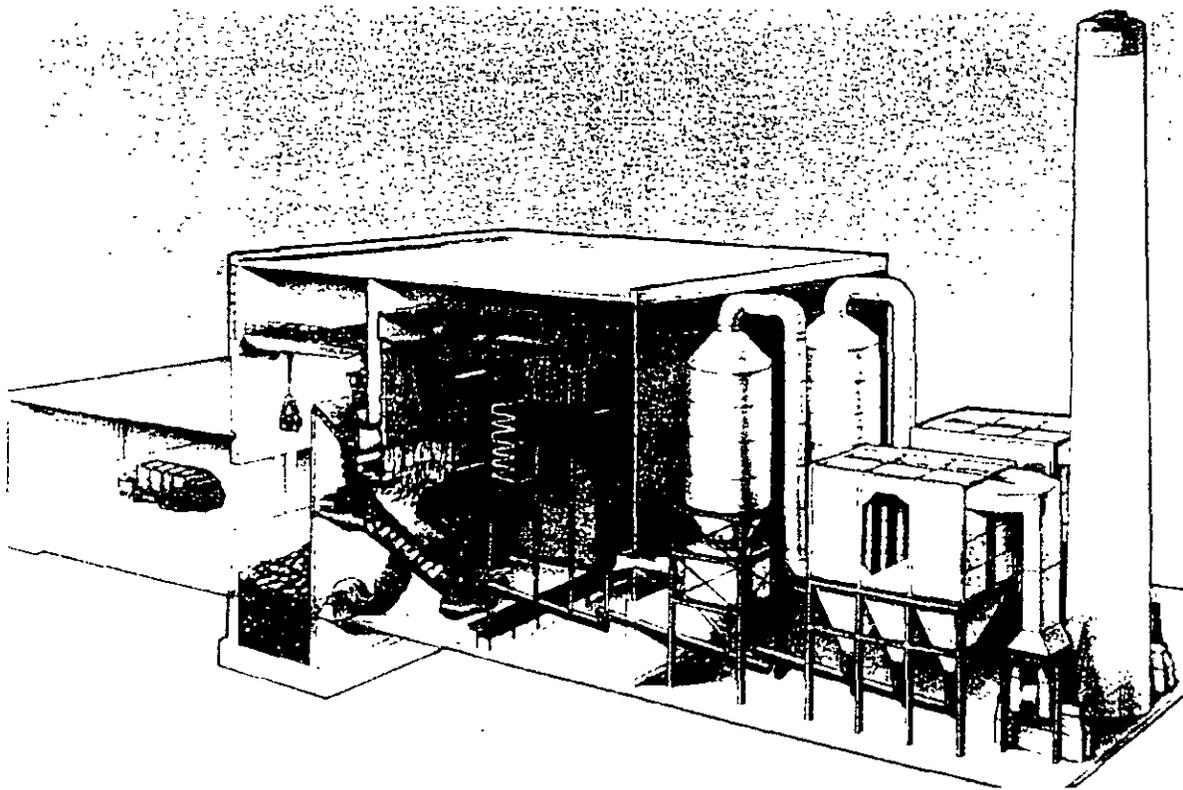


FIG. 6. SECCIÓN A TRAVÉS DE UNA INCINERADORA MODERNA DE QUEMADO EN BRUTO DE RSU

Uno de los componentes más cruciales de un sistema de incineración de quemado en bruto es el sistema de parrillas. Este sistema sirve para diversas funciones, incluyendo el movimiento de los residuos a través del sistema, la mezcla de los residuos y la inyección de aire para la combustión. Son muchas las variantes posibles de parrillas, en base a elementos de alternancia, oscilación y rotativos. En

la Figura 7 se muestran algunos sistemas de parrillas para incineradoras de combustión en bruto.

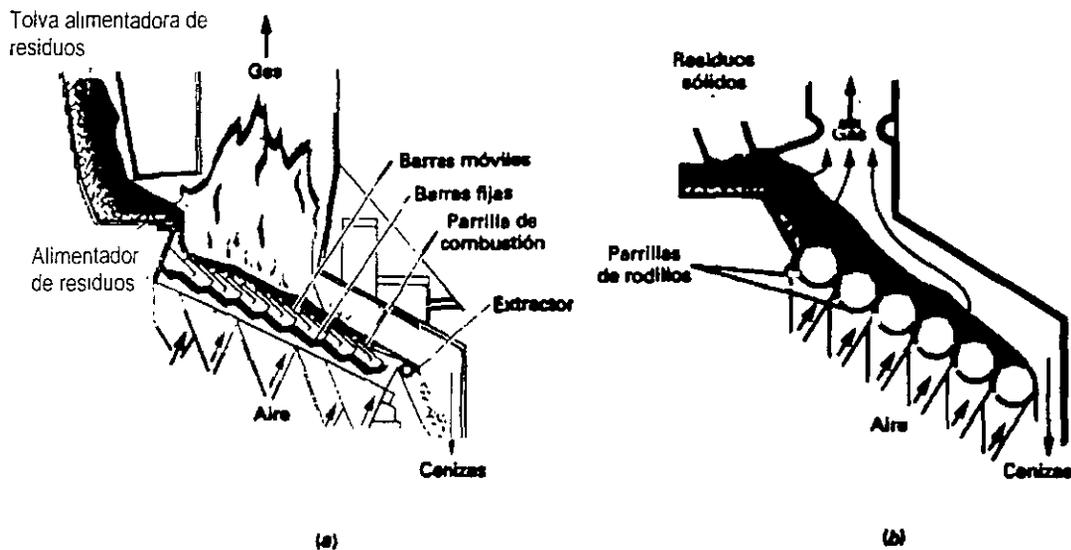


FIG. 7. SISTEMAS DE PARRILLAS UTILIZADO EN INCINERADORAS PARA QUEMADO EN BRUTO DE RSU: a) PARRILLA MARTIN Y b) PARRILLA DUSSELDORF.

Sistemas de incineración alimentados por CDR. En las incineradoras alimentadas por CDR, normalmente, se quema el CDR sobre una alimentadora de parrilla móvil. La parrilla proporciona una plataforma en la que el CDR puede quemarse teniendo en cuenta la introducción de aire secundario para provocar turbulencias y una combustión uniforme. Los mejores resultados se han obtenido con sistemas de incineración específicamente diseñados para CDR, pero algunas calderas alimentadas con carbón han sido modificadas con éxito para quemar CDR o mezclas CDR/carbón (ver Figura 8). Comparado con la naturaleza variable de los RSU en bruto, el CDR puede producirse con una calidad satisfactoria para cumplir las especificaciones de energía, humedad y contenido en cenizas. El CDR se puede producir en forma triturada o fibrosa, o en pelets densificados. El CDR densificado (CDRd) es más costoso de producir, pero más fácil de transportar y almacenar. Cualquiera de las formas puede quemarse aisladamente o mezclada con carbón.

Por el mayor contenido energético del CDR comparado con los RSU en bruto, los sistemas de incineración alimentados con CDR pueden ser físicamente más pequeños que los sistemas de combustión en bruto valorados comparativamente. Un sistema alimentado por CDR también puede ser controlado más eficazmente que un sistema de combustión en bruto por la naturaleza más homogénea del CDR, permitiendo un mejor control de la combustión y un mejor rendimiento de los dispositivos para controlar la contaminación del aire. Además, un sistema de separación primaria correctamente diseñado puede separar porciones importantes de metales, plásticos y otros materiales que pueden contribuir a la producción de emisiones contaminantes.

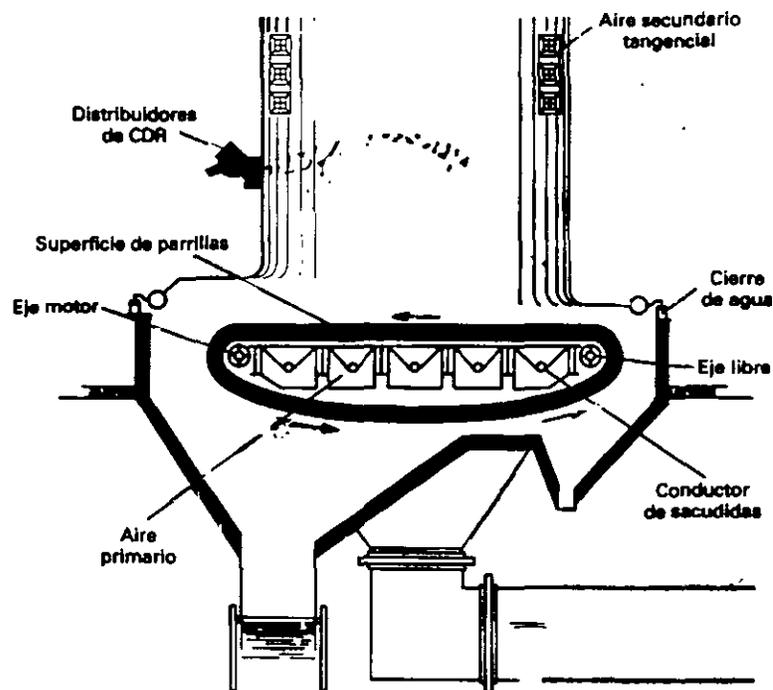


FIG. 8. SECCIÓN A TRAVÉS DE UNA INCINERADORA MODERNA ALIMENTADA CON CDR CON ALIMENTADOR DE PARRILLA MÓVIL.

Incineración con lecho fluidizado

La incineración con lecho fluidizado (ILF) es una alternativa a los sistemas convencionales de incineración. En su forma más sencilla, un sistema ILF consiste en un cilindro vertical de acero, normalmente forrado con refractario; un lecho de arena, una placa rejilla de apoyo y toberas de inyección de aire (ver Figura 9). Cuando se fuerza el aire hacia arriba a través de las toberas, el lecho se fluidiza y se expande hasta dos veces su volumen en reposo. Se pueden inyectar combustibles sólidos como carbón o CDR en el reactor por encima o por debajo del lecho fluidizado. La acción <<hirviente>> de lecho fluidizado provoca turbulencias y favorece la mezcla, y transfiere calor al combustible. Cuando se pone en funcionamiento se utiliza combustible auxiliar (gas natural o aceite combustible) para subir la temperatura del lecho hasta la temperatura operacional (790 a 950°C). Después del arranque, normalmente no hace falta combustible auxiliar; de hecho, el lecho permanece caliente hasta 24 horas, lo que permite un arranque rápido sin combustible auxiliar.

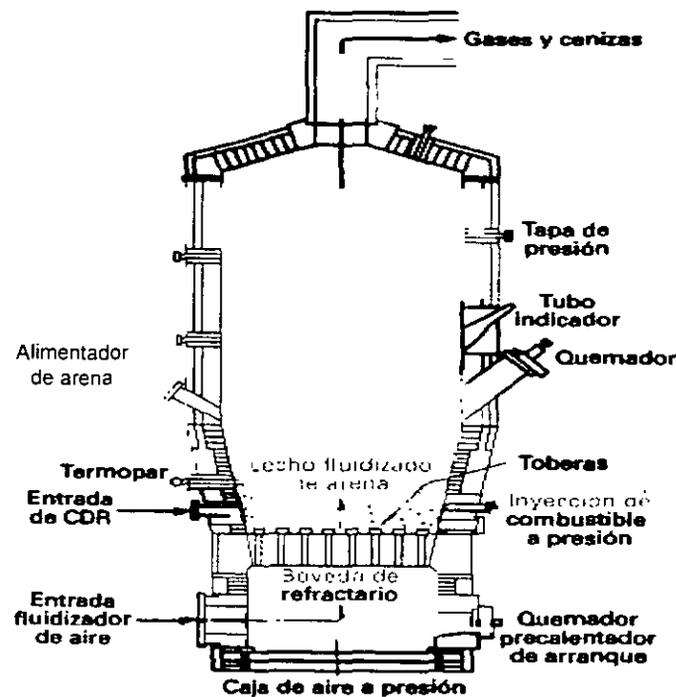


FIG. 9. SISTEMA DE INCINERACIÓN CON LECHO FLUIDIZADO PARA COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS

Los sistemas ILF son bastante versátiles y pueden operarse sobre una amplia variedad de combustibles, incluyendo RSU, fangos, carbón, y numerosos residuos químicos: El material del lecho puede ser arena o caliza (CaCO_3). Cuando se utiliza caliza, ésta reacciona con el oxígeno y el dióxido de azufre (SO_2), producido por la combustión de residuos que contienen azufre, para emitir dióxido de carbono y formar sulfato de calcio (CaSO_4), un sólido que se puede separar con la ceniza. El uso de caliza para el material del lecho permite la combustión de carbón con un alto contenido de azufre y tener mínimas emisiones de dióxido de azufre.

Actualmente están siendo utilizados varios sistemas ILF para la incineración de residuos sólidos en todo el mundo. Una de las primeras instalaciones fue una pequeña unidad de lecho fluidizado (150 t/d) en Lausanne, Suiza. Se utiliza para el tratamiento conjunto de RSU y fangos deshidratados procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Una caldera aprovecha el calor para generar vapor, que se utiliza para calefacción y generación de electricidad. En Duluth, Minnesota, se construyó una planta a escala más grande (700 t/d). Se utiliza la planta para tratar 300 t/d de fangos deshidratados de plantas de tratamiento de aguas residuales y 400 t/d de RSU. Los RSU son procesados con un sistema primario antes de la incineración (ver Figura 10). Un sistema ILF está funcionando también en Fujisawa, Japón. El sistema emplea un diseño en propiedad de lecho fluidizado-lecho móvil, que permite el quemado en bruto de RSU no procesados.

Sistemas para la recuperación de calor

Casi todos los nuevos sistemas para la incineración de residuos sólidos actualmente bajo construcción en Estados Unidos y Europa emplean alguna forma de recuperación energética para ayudar a sufragar los costos operacionales y reducir los costos de inversión del equipamiento para el control de la contaminación aérea. La energía se puede recuperar a partir de los gases calientes de combustión generados incinerando RSU o CDR mediante dos métodos:

- Cámaras de combustión con pantallas.
- Calderas de calor residual.

Puede producirse agua caliente o vapor. El agua caliente puede utilizarse para aplicaciones industriales a baja temperatura o para calefacción central. El vapor es más versátil porque puede utilizarse para calefacción y para generación de energía eléctrica. Los ingresos resultantes pueden pagar parcialmente los costos operacionales del sistema.

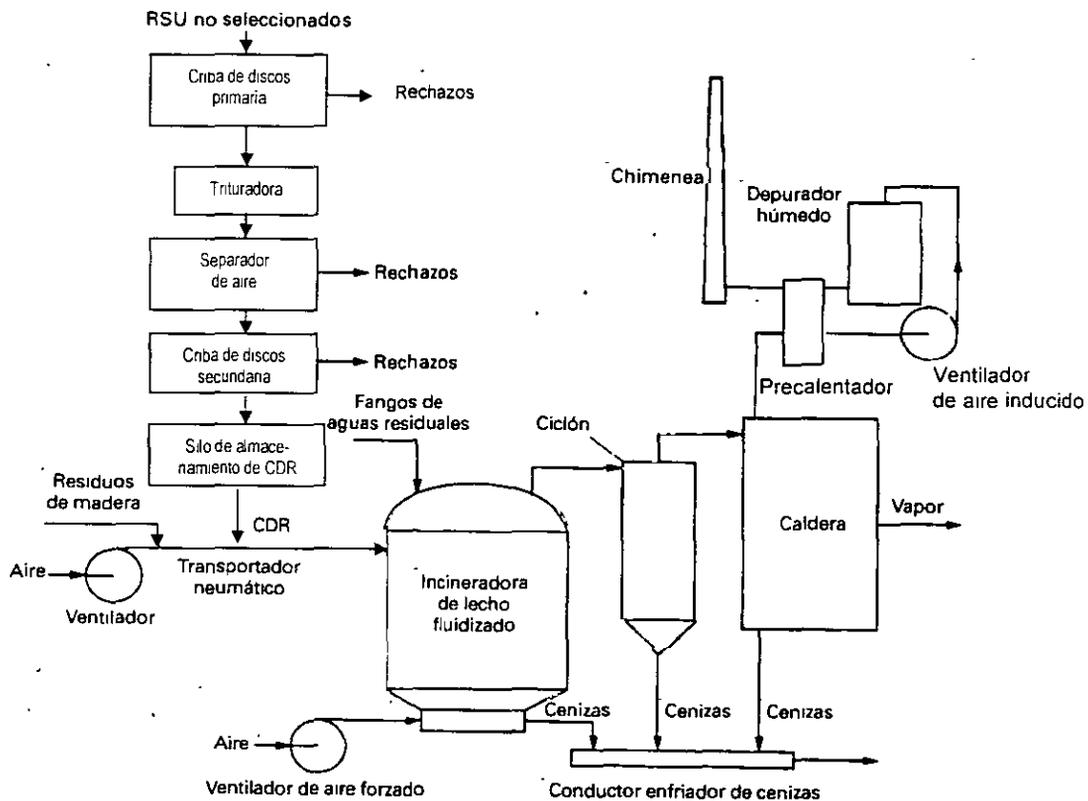


FIG. 10. ESQUEMA DE DULUTH, MINNESOTA, SISTEMA CON LECHO FLUIDIZADO PARA LA COMBUSTIÓN DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES, COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS Y RESIDUOS DE MADERA

La recuperación de calor también tiene un efecto beneficioso en la reducción de los costos de inversión y operación del equipamiento para el control de la contaminación atmosférica. En la práctica, cuando se utilizan sistemas para la incineración de RSU sin equipamiento para la recuperación de calor, se ha visto la necesidad de proporcionar del 100 hasta el 200 por 100 de aire en exceso para llegar a las condiciones de combustión y turbulencia y para controlar la escorificación y acumulación de otros materiales en las paredes de la incineradora. El gran flujo resultante de los gases de combustión hace caro el uso de tales sistemas por la capacidad extra necesaria en el equipamiento para el control de la contaminación del aire. En contraste, cuando se utilizan sistemas para la recuperación del calor, resulta adecuada la aplicación de un 50 hasta un 100 por 100 de exceso de aire, reduciendo así el tamaño de los dispositivos que controlan la contaminación del aire. El enfriamiento de los gases de combustión, que se produce durante la recuperación de calor, también reduce todavía más el volumen de los gases de combustión.

Cámara de combustión con pantalla de agua. En este método, las paredes de la cámara de combustión se forran con tuberías de caldera que se disponen verticalmente y se sueldan en secciones continuas. El agua que corre a través de estos tubos absorbe el calor generado en la cámara de combustión y genera vapor. Normalmente las zonas en la pared del horno adyacentes a las parrillas se forran con materiales refractarios (resistentes al calor) para proteger los tubos de las temperaturas excesivas y de la abrasión mecánica.

Caldera de calor residual. En este método, la cámara de combustión del horno está forrada con materiales refractarios aislantes para reducir las pérdidas caloríficas a través de las paredes del horno. Los gases calientes de la combustión se pasan a través de una caldera de calor residual aparte, localizada externamente a la cámara de combustión. Se utiliza este método de recuperación de calor comúnmente en unidades de incineración modular, que se tratan más

adelante En algunos casos, se puede añadir una caldera de calor residual a un horno existente revestido en refractario. (ver Figura 11)

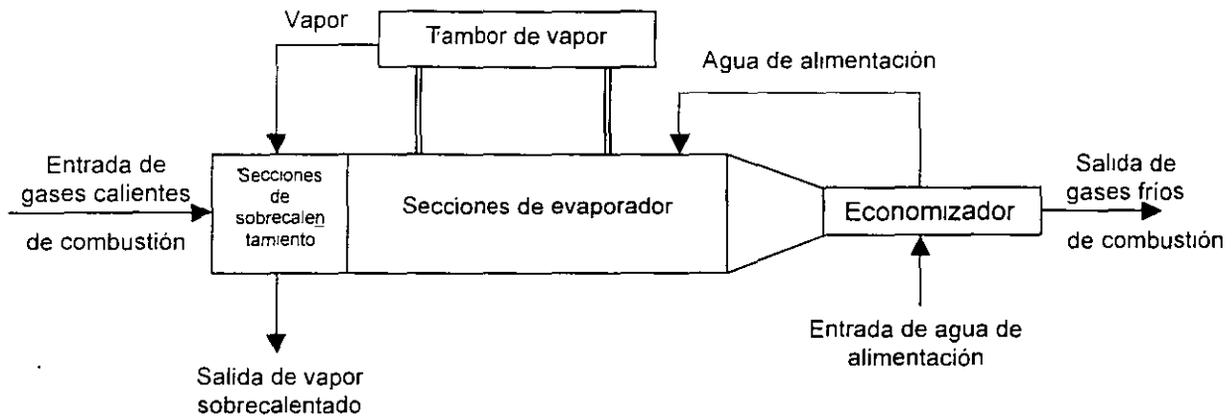


FIG. 11. CALDERA DE CALOR RESIDUAL PARA RECUPERAR CALOR DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Análisis. Un sistema para la recuperación de calor es esencialmente un intercambio de calor. El calor de los residuos quemados es transferido a un fluido productivo (agua) mediante un gradiente de temperatura entre los gases de combustión y el fluido productivo. El diseño y el análisis del sistema de traspaso de calor es esencialmente el mismo que para una planta térmica que queme carbón o aceite.

Se puede hacer un análisis simplificado mediante el uso de tasas de producción de vapor, que relacionan la producción de vapor con el contenido energético de los residuos. Como se muestra en la Tabla 2, las tasas de producción de vapor, varían de 1,5 a 4,3 t vapor/t residuos, según los contenidos energéticos y en humedad de los residuos.

TABLA 2
TASAS DE PRODUCCIÓN DE VAPOR PARA LA INCINERACIÓN DE RSU

	Contenido energético, tal como recibido, HHV, Kcal/kg				
	3.627	3.348	2.790	2.232	1.674
Calidad de RSU					
Humedad porcentaje	15,0	18,0	25,0	32,0	39,0
No combustible, porcentaje	14,0	16,0	20,0	24,0	28,0
Combustible, porcentaje	71,0	66,0	55,0	44,0	33,0
Vapor generado					
t/t de RSU	4,3	3,9	3,2	2,3	1,5

Criterios para la selección del sistema

La selección de un sistema de procesamiento térmico es una labor compleja y económicamente costosa. La mayoría de los sistemas se construyen con algún tipo de contrato <<llave en mano>>, donde un solo contratista asume la total responsabilidad del diseño y de la construcción del sistema. Alternativamente, se construyen algunos sistemas bajo un contrato de servicio total en el que el contratista diseña, construye y opera el sistema durante un número de años fijo.

Criterios ingenieriles de rendimiento. Los ingenieros ambientales juegan un papel intermedio en el proceso de elegir el sistema con la preparación de una serie de especificaciones ingenieriles de rendimiento, que definen el rendimiento del sistema en vez de los detalles de las tecnologías específicas, como el tipo de parrilla o el sistema para manejar cenizas. Las especificaciones de rendimiento dan lugar a un sistema más rentable, porque amplían la competencia y motivan el avance técnico de la industria. En la Tabla 3 se listan algunos criterios de rendimiento. Estos incluyen productividad, confiabilidad, reducción en volumen y peso, emisiones de aire, producción de energía, necesidades de espacio y necesidades de servicios públicos.

Criterios de rendimiento económico. El rendimiento económico de un sistema de procesamiento térmico también debe evaluarse para elegir entre sistemas

competitivos. La mejor forma de comparar alternativas es mediante el uso del financiamiento del ciclo vital, que conforma los costos de operación y mantenimiento durante toda la vida del sistema. La industria de residuos sólidos ha desarrollado un acercamiento estándar hacia el costeamiento del ciclo vital, conocido como declaración de ingresos proforma. Se utiliza una aproximación del valor neto presente para normalizar los costos de capital y de operación e ingresos, a una base temporal de <<año cero>>, permitiendo así la valoración de los costos en una base de dólar por tonelada.

TABLA 3
CRITERIOS DE RENDIMIENTO PARA LA INCINERACIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Especificación	Unidades	Comentarios
Valoración nominal	T/d	Basado en RSU no seleccionados para sistemas de combustión en bruto o de CDR.
Producción bruta de electricidad	KW	No incluye uso interno de electricidad. Basado en valoración nominal y el contenido energético estándar de RSU o CDR, el cual debe ser especificado.
Producción neta de electricidad	KW	Incluye todos los usos internos y pérdidas
Disponibilidad	h/año	Tiempo estimado que el sistema estará funcionando, teniendo en cuenta todo el mantenimiento previsto.
Emisiones atmosféricas	g/d	Según regulaciones necesarias para cumplir las normativas federales, estatales y locales sobre la contaminación atmosférica.
Equipamiento para controlar la contaminación atmosférica	---	Especificaciones de equipamiento para controlar la contaminación atmosférica, según sean necesarios para cumplir las normativas sobre emisiones atmosféricas
Rechazos sólidos	t/d	Estimación de rechazos de cenizas de fondo y cenizas volantes, basada en unidades similares en funcionamiento o en ensayos piloto
Vertido de aguas residuales	l/d	Estimación de la cantidad y calidad de las aguas residuales
Mano de obra	Personas	Incluye gestión, operación y mantenimiento.
Costos de inversión y todo el equipamiento	\$	Incluye ingeniería, construcción y costos de mano de obra en el lugar, estructuras.
Costos operacionales	\$/año	Incluye mano de obra, mantenimiento rutinario y arreglos, servicios públicos y costo de evacuación de los rechazos sólidos y las aguas residuales.

4. SISTEMAS DE PIROLISIS

Como se ha definido anteriormente, pirólisis es el procesamiento térmico de residuos en ausencia total de oxígeno. Desafortunadamente, hay mucha confusión en la literatura sobre el tema y muchos sistemas llamados pirólisis realmente son de gasificación. Se usan sistemas de pirólisis y gasificación para convertir los residuos sólidos en combustibles gaseosos, líquidos y sólidos. La diferencia principal entre los dos sistemas consiste en que los sistemas de pirólisis utilizan una fuente de combustible externa para conducir las reacciones endotérmicas de pirólisis en un ambiente libre de oxígeno, mientras que los sistemas de gasificación se sostienen sin aportes externos y usan aire u oxígeno para la combustión parcial de los residuos sólidos.

Descripción del proceso de pirólisis

Como la mayoría de las sustancias orgánicas son térmicamente inestables se puede romper, con un calentamiento en un ambiente libre de oxígeno, mediante una combinación de desintegración térmica y reacciones de condensación en fracciones gaseosas, líquidas y sólidas. Pirólisis es el término utilizado para describir este proceso. Al contrario de los procesos de combustión y gasificación, que son extremadamente exotérmicos, el proceso de pirólisis es altamente endotérmico, requiriendo una fuente de calor externa. Por esta razón, a menudo se utiliza el término destilación destructiva como término alternativo a pirólisis.

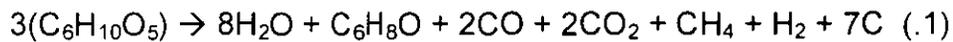
Las tres fracciones de componentes más importantes producidas mediante pirólisis son las siguientes:

- Una corriente de gas que contiene principalmente hidrógeno, metano, monóxido de carbono y diversos gases, según las características del material que es pirolizado.
- Una fracción líquida que consiste en un flujo de alquitrán o aceite que contiene ácido acético, acetona, metanol e hidrocarburos oxigenados complejos. Con

un procesamiento adicional, la fracción líquida puede utilizarse como aceite combustible sintético sustituyendo al aceite combustible convencional número 6.

- Coque inferior, que consiste en carbono casi puro más cualquier material inerte originalmente presente en los residuos sólidos.

Para la celulosa, $C_6H_{10}O_5$ se ha sugerido la siguiente expresión como representativa de una reacción de pirólisis:



En la ecuación (.1), los compuestos líquidos de alquitrán o aceite que se obtienen normalmente son representados por la expresión C_6H_8O . Se ha encontrado que la distribución de las fracciones del producto varía drásticamente según la temperatura en la que se lleva a cabo la pirólisis. En la Tabla 4 se presentan datos representativos sobre el producto en función de la temperatura de operación. En la Tabla 5 se dan análisis típicos del gas de pirólisis en función de la temperatura. Se ha estimado que el contenido energético de los aceites pirolíticos es aproximadamente de 20.394 kJ/kg. En condiciones de máxima gasificación, se ha estimado que el contenido energético del gas resultante sería aproximadamente de 26.081 kJ/m³.

TABLA 4
BALANCE DE MASAS DE PIRÓLISIS

Temperatura °C	Residuos kg	Gases, Kg	Ácidos y alquitranes pirolíticos, Kg	Coque, kg	Masa considerada, kg
480	100	12,33	61,08	24,71	98,12
650	100	18,64	59,18	21,80	99,62
820	100	23,69	59,67	17,24	100,59
930	100	24,36	58,70	17,67	100,73

TABLA 5
COMPOSICIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS EN FUNCIÓN DE TEMPERATURA

Gas	Porcentaje en volumen			
	480°C	650°C	820°C	930°C
H ₂	5,56	16,58	28,55	32,48
CH ₄	12,43	15,91	13,73	10,45
CO	33,50	30,49	34,12	35,25
CO ₂	44,77	31,78	20,59	18,31
C ₂ H ₄	0,45	2,18	2,24	2,43
C ₂ H ₆	3,03	3,06	0,77	1,07
Total	99,74	100,00	10,00	99,99

Problemas operacionales con sistemas de pirólisis para RSU

Únicamente se ha instalado un sistema completo de pirólisis en Estados Unidos. Construido en El Cajón, California, el Occidental Flash Pyrolysis System no logró su principal meta operacional (la producción de un aceite de pirólisis vendible) y cerró después de solamente dos años de funcionamiento.

En la Figura 12 se muestra un diagrama de flujo simplificado. El sistema primario empleó dos etapas de trituración, clasificación neumática, cribado y secado para producir una fracción orgánica muy fina. También se recuperaron los metales férreos, el aluminio y el vidrio utilizando separación magnética, separación por corriente foucault y flotación, respectivamente. La parte del sistema que implicaba la pirólisis consistió en varios lazos interconectados de proceso. Los productos finales eran aceites pirolíticos, gases, coque inferior y ceniza.

Como es de esperar con un sistema tan complejo, se encontraron numerosos problemas operacionales. En un análisis del sistema, el fracaso final se atribuyó a varios factores, incluyendo los siguientes:

- Imposibilidad del sistema primario para cumplir con las especificaciones de pureza para el aluminio y el vidrio, lo que afectó a la rentabilidad del sistema.

- Incapacidad del sistema para producir un aceite de pirólisis vendible. El aceite producido tenía un contenido en humedad del 52 por 100, no el 14 por 100 pronosticado con los resultados de una planta piloto. El exceso de humedad en el aceite disminuyó el contenido energético a 8.374 kJ/kg, frente a los 21.166 kJ/kg pronosticados en los ensayos de la planta piloto.

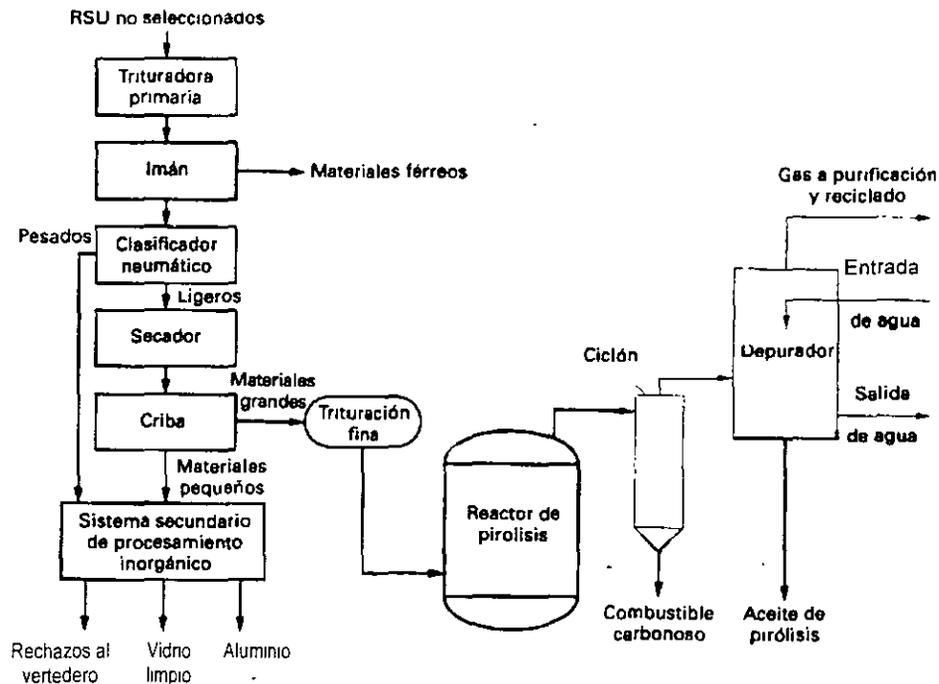


FIG. 12. ESQUEMA DEL OCCIDENTAL FLASH PYROLYSIS SYSTEM PARA LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RSU

Comentario

El sistema de pirólisis aún se usa ampliamente como un proceso industrial para la producción de carbón vegetal a partir de madera, de coque, y gas de coquización a partir de carbón, y de gas combustible y betún a partir de fracciones pesadas de petróleo. A pesar de estos usos industriales, la pirólisis de residuos sólidos no ha sido tan exitosa. La causa principal del fracaso de la tecnología de pirólisis en el pasado parece haber sido la complejidad inherente de los sistemas y la falta de apreciación, por parte de los diseñadores de los sistemas, de las dificultades

asociadas a la producción de una alimentación uniforme a partir de residuos sólidos urbanos.

Aunque algunos sistemas como el Occidental Flash Pyrolysis System no fueron éxitos comerciales produjeron, no obstante, datos valiosos sobre el diseño y el funcionamiento que pueden ser utilizados por los diseñadores en el futuro. Si cambian los costos asociados con la producción de combustibles líquidos sintéticos, la pirólisis puede ser de nuevo un proceso económicamente factible para el procesamiento térmico de los residuos sólidos. Sin embargo, si lo que se desean son combustibles gaseosos, entonces la gasificación es una tecnología más sencilla y rentable.

5. SISTEMAS DE GASIFICACIÓN

Gasificación es el término global utilizado para describir el proceso de combustión parcial en el que un combustible es quemado a propósito con menos aire que el estequiométrico. Aunque el proceso se descubrió en el siglo XIX, sólo recientemente se ha aplicado para el procesamiento de residuos sólidos.

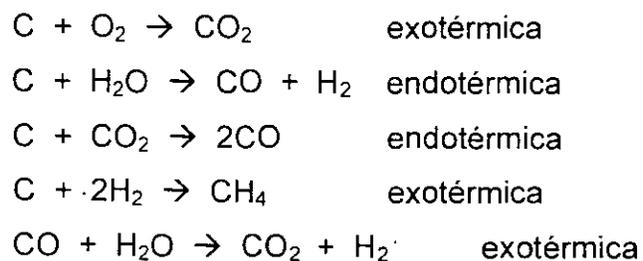
Descripción del proceso de gasificación

La gasificación es una técnica energéticamente eficaz para reducir el volumen de los residuos sólidos y recuperar energía. Esencialmente el proceso implica la combustión parcial de un combustible carbonoso para generar un combustible rico en gas con altos contenidos de monóxido de carbono, hidrógeno y algunos hidrocarburos saturados, principalmente metano. El gas combustible puede quemarse en un motor de combustión interna, turbina de gas o caldera en condiciones de oxígeno adicional. En los siguientes párrafos se explica brevemente el desarrollo histórico y la teoría básica del funcionamiento del proceso de gasificación.

Desarrollo histórico. Desde el siglo XIX se han utilizado los gasificadores. Los primeros gasificadores de carbón fueron construidos en Alemania por Bischof, 1839, y por Siemens, 1861. Los gasificadores de Siemens se utilizaban principalmente para proporcionar combustible a hornos de industria pesada. El desarrollo del equipamiento de limpieza y enfriamiento de gas por Dowson en Inglaterra, 1881, extendió el uso de gasificadores a hornos pequeños y motores de combustión interna.

Para principios de siglo la tecnología de gasificadores había avanzado hasta el punto de cualquier tipo de rechazos celulósicos, como pepitas de aceitunas, paja y cáscaras de nueces, podían ser gasificados. Estos primeros gasificadores se utilizaron principalmente para proporcionar combustible a motores de combustión interna fijos para el molido y otros usos agrícolas. A principios de siglo también se desarrollaron los gasificadores portátiles. Se usaban en barcos, automóviles, camiones y tractores. El verdadero impulso para el desarrollo de la tecnología de los gasificadores fueron las escaseces de gasolina durante la Segunda Guerra Mundial. Durante los años del conflicto, Francia tenía más de 60.000 coches alimentados por carbón vegetal y Suecia tenía cerca de 75.000 autobuses, coches, camiones y barcos equipados con gasificadores quemando madera. Con la vuelta de la gasolina y del gasóleo relativamente baratos y abundantes después de la Segunda Guerra Mundial, casi se olvidó la tecnología de gasificadores.

Teoría sobre gasificación. Durante el proceso de gasificación, se producen cinco reacciones principales:



El calor necesario para sostener el proceso se obtiene de las reacciones exotérmicas, mientras que los componentes de la combustión son generados principalmente por las reacciones endotérmicas.

Cuando un gasificador está funcionando a presión atmosférica con aire como oxidante, los productos finales del proceso de gasificación son un gas de bajo poder calorífico que normalmente contiene (en volumen) un 10 por 100 de CO₂, un 20 por 100 de CO, un 15 por 100 de H₂ y un 2 por 100 de CH₄ en el balance, siendo el resto N₂; un coque que contiene carbono y los inertes originalmente en el combustible; y líquidos condensables parecidos al aceite pirolítico. Debido al efecto diluyente del nitrógeno en el aire de entrada, el gas de bajo poder calorífico tiene un contenido energético de aproximadamente 5.600 kg/m³. El funcionamiento de los gasificadores refinados al aire es bastante estable, produciendo una calidad de gas bastante constante en una amplia gama de tasas de entrada de aire. La habilidad para operar bajo distintas condiciones de carga se conoce como relación de rechazo. Cuando se va a usar oxígeno puro como oxidante en vez de aire, como en el sistema Purox® (descrito más adelante), puede producirse un gas de un poder calorífico medio con un contenido energético de aproximadamente 11.200 kJ/m³.

Tipos de gasificadores

Hay cinco tipos básicos de gasificadores:

- De lecho fijo vertical
- De lecho fijo horizontal
- De lecho fluidizado
- De hogar múltiple
- De horno rotario

Como se han utilizado más los tres primeros tipos, éstos se describen brevemente a continuación.

Lecho fijo vertical. El gasificador de lecho fijo vertical tiene algunas ventajas sobre los otros tipos de gasificadores, incluyendo su simplicidad y los costos de inversión relativamente bajos. Sin embargo, este tipo de reactor es más sensible a las características mecánicas del combustible; requiere un combustible uniforme, homogéneo, como el CDR densificado. Como se muestra en la Figura 13, el flujo del combustible a través del gasificador se produce por gravedad, con el aire y el combustible fluyendo conjuntamente a través del reactor. Los productos finales del proceso son principalmente gas de bajo poder calorífico y coque. Es posible operar un reactor de lecho fijo vertical con un flujo contracorriente, con el aire y el gas subiendo a través del reactor.

Se ha comprobado a escala piloto el funcionamiento de un gasificador de lecho fijo vertical utilizando CDR densificado como combustible. El gasificador fue operado a una baja temperatura (650 a 815°C) en forma no escorificada, produciendo un gas de bajo poder calorífico (aproximadamente 2.800 kJ/m³), una pequeña cantidad de condensado líquido y una ceniza y coque secos y grandes. El coque demostró tener unas características de adsorción similares al carbono activo comercial y puede ser útil para el tratamiento avanzado de aguas residuales.

El gas de bajo poder calorífico producido por el sistema fue probado en un motor diesel Ford de tres cilindros. El motor solamente necesitaba unas pequeñas modificaciones para funcionar con una combinación de gas de bajo poder calorífico (80 por 100 de la entrada de energía) y combustible diesel (20 por 100 de la entrada de energía). Con ensayos se encontró que el motor modificado consiguió el 76 por 100 del rendimiento que el mismo motor consigue con el 100 por 100 de combustible diesel.

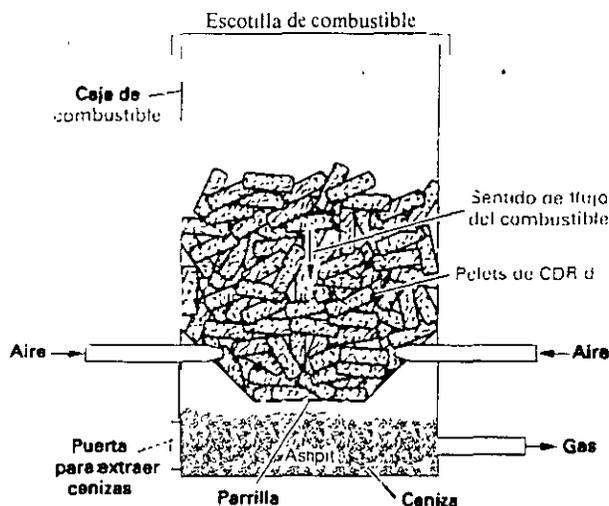


FIG. 13. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO VERTICAL DE ALIMENTACIÓN EN LOTES

Los gasificadores pueden conseguir bajas emisiones gaseosas contaminantes con dispositivos simples para el control de la contaminación atmosférica. Los resultados de los ensayos de emisiones gaseosas, utilizando el dispositivo mostrado en la Figura 14, son presentadas en la Tabla 6. El dispositivo simula la combustión de un gas de bajo poder calorífico en una caldera mediante la combustión del gas con un sistema de combustión retardada. Se utilizó un ciclón sencillo de alta eficacia para controlar las partículas antes de la combustión retardada. Las emisiones son comparables o menores que las emisiones de los sistemas de combustión con oxígeno en exceso, que emplean sistemas mucho más complejos para el control de las emisiones.

Los gasificadores de lecho fijo vertical también pueden operarse con oxígeno puro como oxidante en vez de aire. La operación con oxígeno puro provoca la producción de un gas de poder calorífico medio con un contenido energético de 270 a 2.990 kJ/m^3 y una composición media del gas de un 50 por 100 de CO , 30 por 100 de H_2 , 14 por 100 de CO_2 , 4 por 100 de CH_4 , 1 por 100 de hidrocarburos y

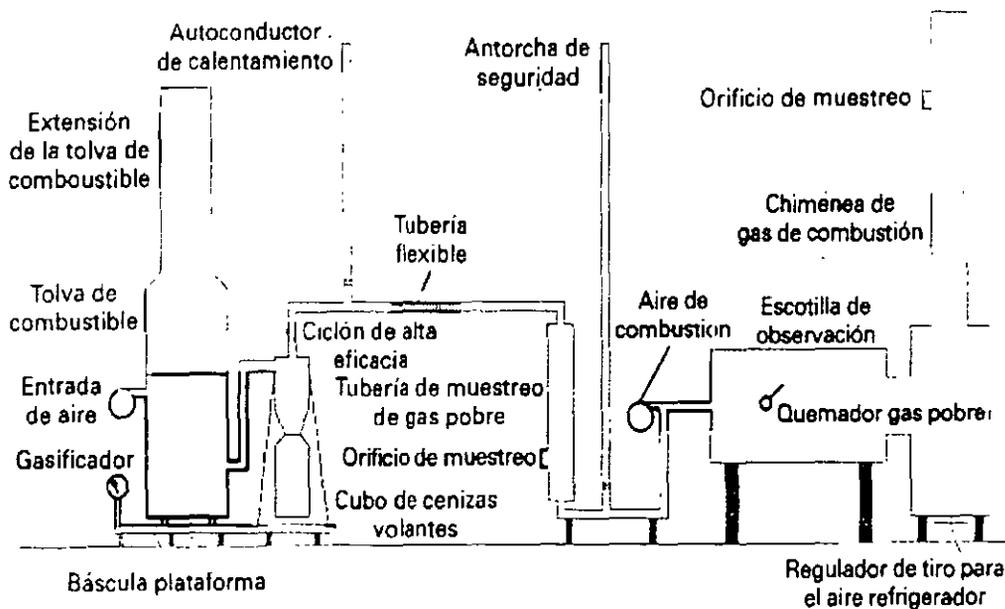


FIG. 14. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA DE ENSAYO DE EMISIONES PARA UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE GASIFICADOR CON COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS

TABLA 6
EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE GASIFICADORES

Emisión	Unidad	Valores
NO _x	ppmv	60-115
SO ₂	g/m ³ · N	0,091-0,227
Hidrocarburos no condensables	Ppmv	<1
Tasa total de emisión de partículas (Método 5 de la EPA)	g/m ³ · N	0,068-0,164
Diámetro de partícula	µm	8

1 por 100 de N_2 . Un sistema semejante fue desarrollado por la Corporation Union Carbide y puesto en el mercado como sistema Purox®. Como se puede ver en la Figura 15, el sistema estaba formado por un reactor, un sistema primario mínimo (solamente trituración), un tren de limpieza de gas (precipitador electrostático, absorbedor de ácido, condensador y purificador de agua) y una planta de oxígeno. El gasificador funcionó a temperaturas relativamente altas (1.425 a 1.450°C), produciendo una escoria líquida como subproducto. Aunque se ensayó una planta piloto con éxito utilizando diversos tipos de residuos, incluyendo los RSU y los lodos de aguas negras, el sistema Purox® ya no se encuentra en producción comercial.

Lecho fijo horizontal. El gasificador de lecho fijo horizontal se ha convertido en el tipo más disponible comercialmente. Irónicamente no es conocido normalmente como gasificador, sino por los términos: incineradora de aire restringido (incineradora), incineradora de aire controlado, o incinerador pirolítica. El término utilizado en esta sección es unidad de combustión modular (UCM)

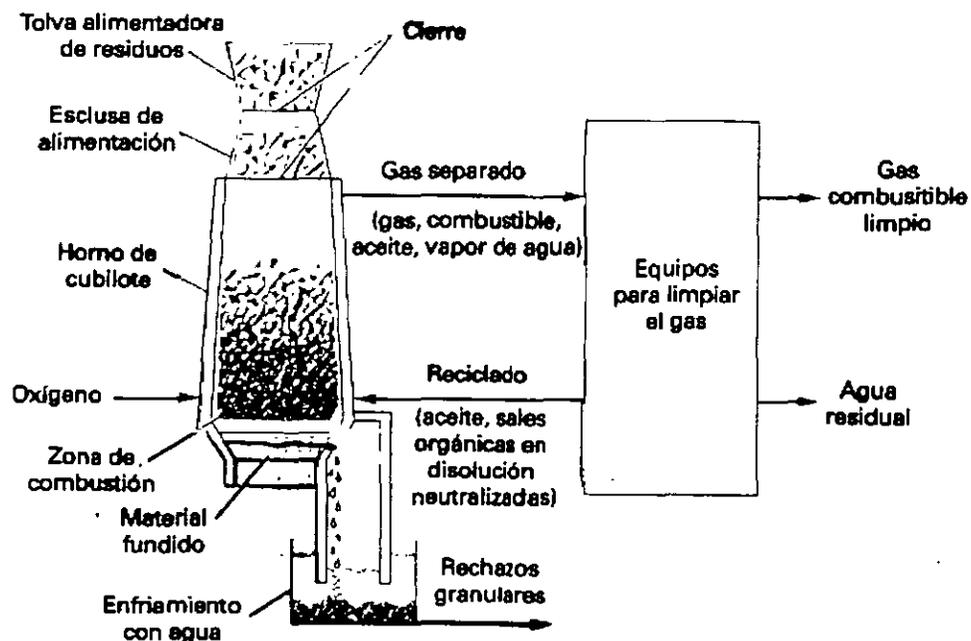


FIG. 15. DIAGRAMA DEL SISTEMA PUROX® DE GASIFICADOR ALIMENTADO POR OXÍGENO PARA RSU NO SELECCIONADOS

Una UCM, como se muestra en la Figura 16, está formada por dos componentes importantes: una cámara de combustión primaria y una cámara de combustión secundaria. En la cámara primaria, los residuos se gasifican mediante una combustión parcial en condiciones subestequiométricas, produciéndose un gas de bajo poder calorífico que después fluye a la cámara de combustión secundaria, donde se quema con oxígeno adicional. La combustión secundaria produce gases de altas temperaturas (650 a 870°C) de combustión completa (CO_2 , H_2O , N_2) que se pueden utilizar para producir vapor o agua caliente en una caldera adjunta de calor residual. Una menor velocidad y turbulencia en la cámara de combustión primaria minimiza el arrastre de las partículas en la corriente de gas que conduce a unas emisiones de partículas más bajas que en las incineradoras convencionales de oxígeno adicional.

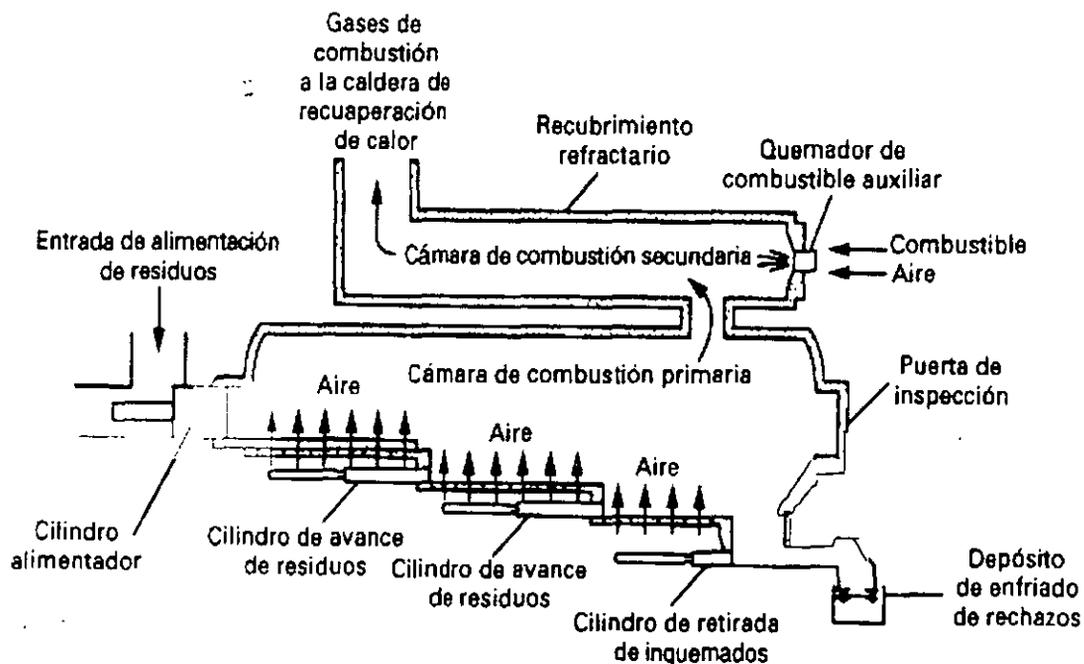


FIG. 16. UNIDAD DE COMBUSTIÓN MODULAR UTILIZADA PARA RSU DOMÉSTICOS Y COMERCIALES Y PARA RESIDUOS INDUSTRIALES SELECCIONADOS

Las UCM están disponibles comercialmente por varios fabricantes en tamaños estandarizados que varían en capacidad entre 45 y 3.800 kg/h. Las unidades son montadas en fábrica y transportadas en camión o ferrocarril hasta el lugar del proyecto, donde requieren un trabajo in situ mínimo para su instalación. Las UCM más grandes tienen alimentación continua y separación de cenizas. Las unidades más pequeñas operan de forma discontinua y son cargadas manualmente. Normalmente se cargan durante el día laboral y los lotes se queman solos en la instalación durante la noche.

Cuando se instalan calderas para la recuperación del calor, el vapor o el agua caliente producidos deben estar unidos cuidadosamente a un consumidor cercano. Algunas aplicaciones incluyen la incineración de residuos de madera en una fábrica de madera laminada, donde se aprovecha el vapor en el proceso de producción, y la incineración de RSU en un polígono industrial pequeño, donde se utiliza el vapor para la calefacción y el aire acondicionado de los edificios cercanos industriales y de oficinas.

Lecho fluidizado. El uso de la combustión en lecho fluidizado para la incineración de RSU con aire en exceso se ha tratado anteriormente. Con modificaciones mínimas, se puede operar un sistema de combustión de lecho fluidizado en forma subestequiométrica como gasificador. Se han llevado a cabo varios ensayos a escala piloto con RSU como combustible. En Kingston, Ontario, se ha probado un prototipo de gasificador de lecho fluidizado de 1 t/h alimentado por CDRd. En Japón se ha desarrollado un gasificador de lecho fluidizado dual. El sistema emplea dos lechos fluidizados, uno para el combustible y otro para la combustión del coque, utilizando arena como medio de transferencia de calor entre los dos lechos y produciendo un gas de poder calorífico medio. En Italia se ha construido un sistema de gasificador de lecho fluidizado utilizando CDRd. El sistema produce gas de bajo poder calorífico que se utiliza en las calderas para la producción de vapor y electricidad.

Comentario

La experiencia con unidades a escala real y a escala piloto ha demostrado que no se han conseguido resultados confiables con gasificadores de combustión en bruto. Es necesaria alguna forma de procesamiento del CDR para separar los metales y otros inertes con el fin de mejorar el rendimiento de los reactores y reducir las emisiones atmosféricas. Excepto para las unidades de combustión modular, los sistemas de gasificación actualmente no pueden considerarse como una tecnología comercial. Debido a sus bajas emisiones atmosféricas, comparadas con las de los sistemas de incineración con oxígeno adicional, los gasificadores de lecho fijo vertical y de lecho fluidizado pueden tener un mayor potencial para su desarrollo en el futuro y podrían, de nuevo, ser <<redescubiertos>>.

6. SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL

El funcionamiento de sistemas de recuperación térmica produce diversos impactos sobre el ambiente, incluyendo emisiones gaseosas y de partículas, rechazos sólidos y efluentes líquidos. El diseño correcto de los sistemas de control para estas emisiones es una parte crítica del diseño de un sistema de procesamiento térmico. En algunos casos, el costo y la complejidad de un sistema de recuperación térmica. En esta sección se presenta una introducción a estos impactos ambientales y a las tecnologías de control para gestionarlos.

Emisiones atmosféricas

El Acta Federal del Aire Limpio obligó a la Agencia para la Protección Ambiental (EPA) a la identificación de los contaminantes con una importancia específica. Se recogieron datos científicos sobre las relaciones entre diversas concentraciones de contaminantes atmosféricos y sus efectos adversos para los humanos y el ambiente. Esta información fue utilizada para preparar una lista de criterios de contaminación y de niveles ambientales aceptables. Estos niveles son conocidos como Normas sobre la Calidad del Aire Ambiental. Los contaminantes de criterio

identificados incluyen: monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono, materia aspirable en partículas (también conocida como PM10) y plomo. Además de estos contaminantes, EPA ha identificado otros contaminantes atmosféricos preocupantes, pero todavía no ha establecido Normativas de Aire Ambiental para ellos. Estos contaminantes son conocidos colectivamente como contaminantes no-clasificados. En esta sección se proporcionan breves descripciones de los contaminantes clasificados y de los más significativos contaminantes aún no clasificados.

Óxidos de nitrógeno (NO_x). Los dos óxidos de nitrógeno más importantes son NO (monóxido de nitrógeno) y NO₂ (dióxido de nitrógeno), colectivamente llamados NO_x. Hay dos fuentes principales de NO_x en la combustión. El NO_x térmico se forma mediante reacciones entre el nitrógeno y el oxígeno en el aire utilizado para la combustión. El NO_x combustible se forma mediante reacciones entre oxígeno y nitrógeno orgánico en el combustible. Los óxidos de nitrógeno son precursores de la formación de ozono (O₃) y peroxi-acetonitrilo (PAN), oxidantes fotoquímicos conocidos como smog (niebla con humo). Los óxidos de nitrógeno también contribuyen a la formación de aerosoles nítricos (gotas líquidas) que pueden causar niebla y lluvia ácida.

Dióxido de azufre (SO₂). El dióxido de azufre se forma mediante la combustión de combustibles que contienen azufre. El dióxido de azufre es un gas irritante para los ojos, la nariz y la garganta. En altas concentraciones puede causar enfermedades o la muerte en personas ya afectadas por problemas pulmonares como asma o bronquitis. El dióxido de azufre se relaciona con la producción de lluvia ácida que afecta a lagos, ríos y bosques.

Monóxido de carbono (CO). El monóxido de carbono, formado durante la combustión de materiales carbonosos cuando existe una insuficiencia de oxígeno, reacciona con la hemoglobina en la corriente sanguínea para formar carboxihemoglobina (HbCO). El cuerpo humano confunde la HbCO con la

oxihemoglobina (HbO₂), que normalmente transfiere el oxígeno a los tejidos vivos a través del cuerpo. La falta de oxígeno puede causar dolores de cabeza, náuseas e incluso la muerte en concentraciones extremadamente altas.

Materia particulada (MP). Se forma la materia en partículas durante la combustión mediante varios procesos incluyendo la combustión incompleta del combustible y el arrastre físico de los no combustibles. Las emisiones de partículas causan reducciones en la visibilidad y efectos sobre la salud. Las partículas pequeñas de 10 µm (10 · 10⁻⁶ m) son críticas porque pueden aspirarse profundamente en los pulmones. En la Figura 17 el tamaño relativo de estas partículas se compara con otros polvos. En la Figura 18 se resumen las emisiones de partículas desde varias instalaciones. Hay que resaltar que aproximadamente del 20 al 40 por 100 de las emisiones de partículas son de menos de 10 µm de diámetro.

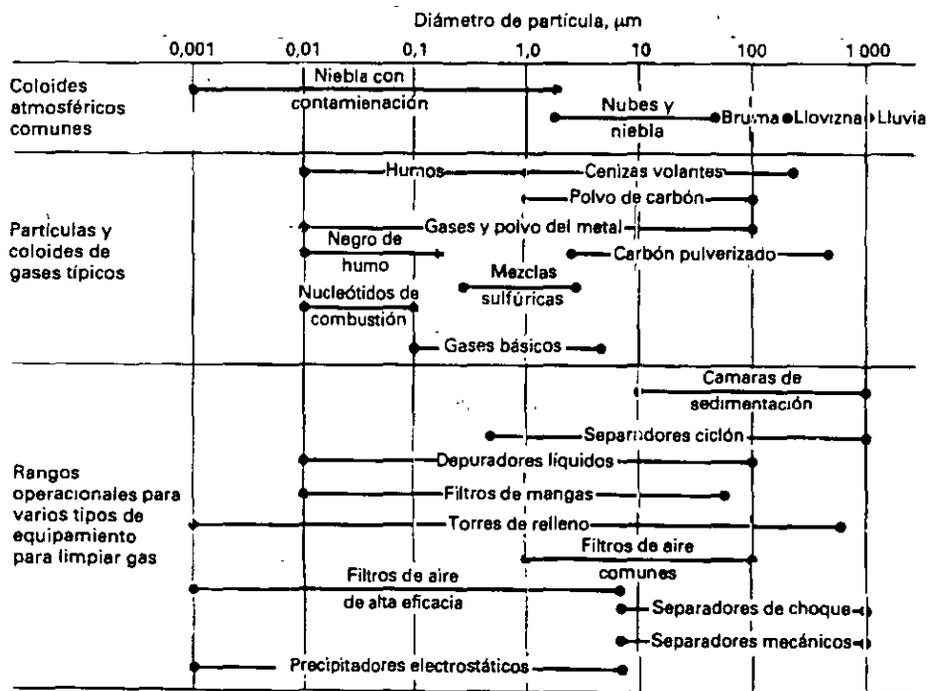


FIG. 17 CLASIFICACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS

Metales. Los residuos sólidos urbanos son una mezcla heterogénea. Muchos artículos relativamente inocuos, tales como plásticos, revistas de lujosa presentación y pilas de linterna, contienen elementos metálicos. En la Tabla 7 se comparan las concentraciones de metales en el aceite y el carbón. Para la mayoría de los metales las concentraciones son superiores en los RSU. Los metales que plantean las mayores inquietudes desde el punto de vista de la salud pública son: cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb). Después de la incineración los metales se emiten o bien como materia en partículas o bien vaporizados en su forma gaseosa. El mercurio es un problema, especial a este respecto, porque se volatiliza a una temperatura relativamente baja, 329°C.

Algunos metales se concentran en pocos productos de consumo y podrían separarse del flujo de residuos antes de la incineración. Por ejemplo, casi todo el mercurio de los RSU se debe a la evacuación de pilas domésticas de celda seca (tipos mercurio, alcalina y cinc-carbono). Se puede atribuir una cantidad más pequeña del mercurio a la evacuación de termómetros domésticos rotos. La separación en origen o de depósito reduciría sustancialmente la carga de mercurio en el ambiente.

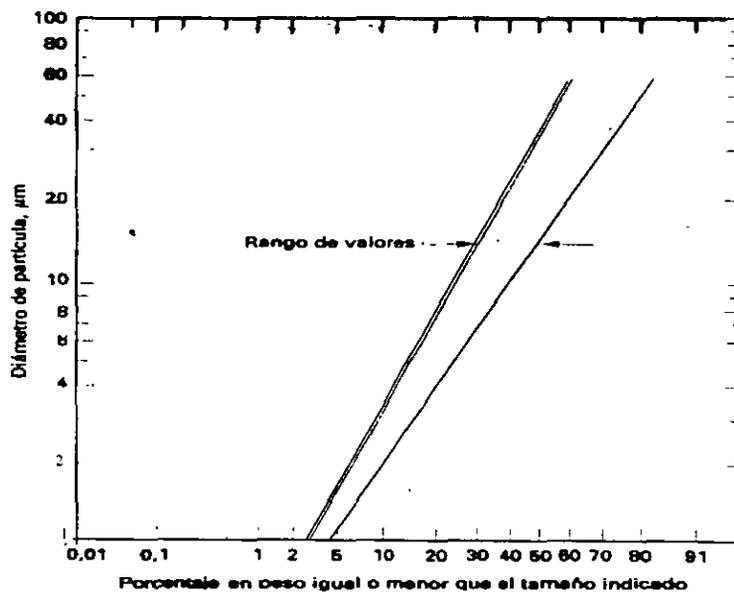


FIG. 18. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE CENIZAS VOLANTES PROCEDENTES DE INCINERADORAS DE RSU

TABLA 7
METALES EN ACEITE, CARBÓN Y RSU

Valores en (µg/MJ) en la combustión									
Metal	Aceite			Carbón			RSU		
	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio
As	nr	nr	nr	20,3	1.501,0	331,0	23,0	1.392	380
Be	nr	nr	nr	4,2	1.550,0	171,0	nd	nd	nd
Cd	nr	nr	nr	1,9	1.001,0	110,0	17,4	3.538	702
Cr	0,26	7,4	3,2	186,0	3.367,0	1.017,0	280,0	125.623	15.102
Cu	1,1	26,0	4,6	138,0	1.218,0	510,0	1.046,0	180.039	26.237
Hg	nr	nr	nr	2,3	96,7	18,7	<130,0	362	166
Mn	0,69	9,4	3,6	47,0	4.753,0	2.081,0	1.059,0	48.022	15.419
Mo	0,50	4,3	1,4	35,5	390,0	173,0	59,8	2.982	938
Ni	9,7	317,0	251,0	104,0	2.131,0	677,0	90,0	51.564	6.380
Pb	3,1	28,7	13,9	83,0	3.084,0	738,0	877,0	136.663	39.290
Sb	nr	nr	nr	2,7	537,0	98,4	30,1	5.404	2.152
Se	nr	nr	nr	9,2	542,0	109,0	8,1	237	61,4
Sn	2,6	57,3	16,2	10,2	710,0	153,0	80,9	8.179	2.466
V	5,2	358,0	129,0	342,0	3.341,0	1.401,0	586,0	5.988	2.432
Zn	5,0	42,6	17,8	186,0	8.825,0	1.582,0	3.018,0	303.716	60.943

Gases ácidos. La incineración de residuos que contiene flúor y cloro genera gases ácidos, como el fluoruro de hidrógeno (HF) y el cloruro de hidrógeno (HCl). Se encuentran cantidades traza de flúor en muchos productos, mientras que el cloro se localiza principalmente en los plásticos, sobre todo en el policloruro de vinilo (PVC), el poliestireno (PS) y el polietileno (PE).

La incineración de residuos que contienen azufre y nitrógeno también puede provocar la formación de gases ácidos. El SO₂ puede oxidarse para formar SO₃ y más tarde reaccionar con las gotas de agua en la atmósfera para formar ácido sulfúrico (H₂SO₄). La emisión de NO₂ puede formar en la atmósfera ácido nítrico (HNO₃).

Dioxinas y furanos. La emisión de compuestos orgánicos de la familia de las dioxinas y furanos se ha convertido en uno de los asuntos más complejos y controvertidos del procesamiento térmico de RSU. Una dioxina es un miembro de la familia de los compuestos orgánicos conocidos como policlorodibenzodioxina

(PCDD). Una molécula de la familia PCDD está formada por una estructura de triple anillo en la que dos anillos del benceno están interconectados por un par de átomos de oxígeno (ver Figura 19a). La familia policlorodibenzofurano (PCDF) tiene una estructura similar, excepto que solamente un átomo de oxígeno une los dos anillos de benceno (ver Figura 19b). Las posiciones numeradas representan átomos de carbono donde los enlaces están libres para unirse a átomos de hidrógeno o cloro. Existen un total de 75 isómeros posibles de PCDD y 135 isómeros de PCDF. En la notación química se refiere a estos isómeros por el número de posición del átomo de cloro. Por ejemplo, el 2,3,7,8-TCDD ó 2,3,7,8-tetracloro-dibenceno-p-dioxina es un PCDD con cuatro átomos de cloro localizados en las posiciones 2, 3, 7 y 8 (ver Figura 20).

La importancia de las familias PCDD y PCDF de compuestos orgánicos radica en que algunos de sus isómeros se encuentran entre las sustancias más tóxicas que existen. Por ejemplo, el LD₅₀ del 2,3,7,8-TCDD para los cobayos es menor que 1 µg/kg de peso corporal. Los isómeros de PCDD y PCDF han sido analizados como contaminantes en diversos productos químicos industriales. Por ejemplo, el herbicida Agent Orange, utilizado como defoliante durante la Segunda Guerra Mundial, se descubrió más tarde que estaba contaminado con cantidades traza de 2,3,7,8-TCDD.

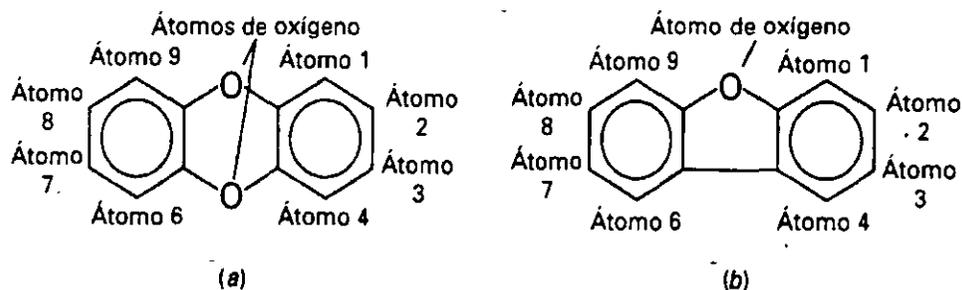


FIG. 19. ESTRUCTURA DE LAS FAMILIAS (a) POLICLORODIBENZODIOXINA (PCDD) Y (b) POLICLORODIBENZOFURANO (PCDF)

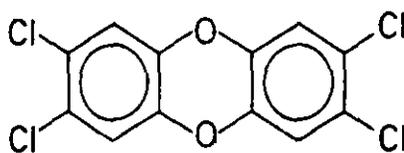


FIG. 20. ESTRUCTURA DEL TETRACLORO-DIBENCENO-P-DIOXINA (2,3,7,8-TCDD)

Aunque existe la evidencia de que los PCDD y los PCDF tienen propiedades cancerígenas (causan cáncer) en animales, recientemente se ha cuestionado su cancerogenicidad potencial en humanos. Según V. N. Houk, del Centro para el Control de Enfermedades (EE.UU.), las dioxinas en altas dosis tienen un bajo riesgo cancerígeno (por ejemplo, en accidentes industriales), pero no son un riesgo cancerígeno en bajas dosis, tal como puede producirse en el aire ambiental cerca de una incineradora de RSU. En cualquier caso, las agencias estatales y EPA han dado una gran prioridad al control de las dioxinas y furanos. Más adelante se tratan las estrategias de control y límites de emisiones para las dioxinas y furanos.

Se sabe que los PCDD y PCDF son emitidos en bajas concentraciones desde los sistemas de incineración que queman RSU y CDR. Hay un debate considerable dentro de las comunidades científicas e ingenieriles acerca de la fuente de estas emisiones. Existen algunas evidencias de que se producen PCDD y PCDF en todos los procesos de combustión, incluso en los hogares domésticos y en estufas de quemar madera.

Los estudios de sedimentos en los Grandes Lagos han mostrado que el flujo de entrada hasta los sedimentos desde la precipitación atmosférica ha ido incrementándose desde los años cuarenta. Las concentraciones de PCDD y PCDF antes de este período de tiempo eran muy bajas, lo que contradice el

argumento de que las emisiones importantes de PCDD y PCDF están causadas por la combustión de madera y carbón. En el mismo estudio se constató una tendencia a la disminución del PCDD y PCDF en los sedimentos desde mediados de los años setenta. El declive fue atribuido a los mejores controles sobre partículas en los sistemas de procesamiento térmico desde la aprobación del Acta de Aire Limpio en 1970.

Todavía no se ha determinado el mecanismo exacto de la formación de PCDD y PCDF en el procesamiento térmico de residuos sólidos. Recientemente se han propuesto tres fuentes de dioxina y furanos en las emisiones procedentes de la incineración de RSU:

- La presencia de dioxinas y furanos en los mismos RSU
- Su formación durante la combustión debido a los compuestos clorados precursores aromáticos
- Su formación durante la combustión procediendo de los hidrocarburos y el cloro.

Las dioxinas pueden entrar en el flujo de residuos como contaminantes en compuestos químicos, tales como los clorofenoles y clorobenzenos que se utilizan en pesticidas, papeles y preservantes de la madera. También se ha sugerido que el clorofenol podría actuar como compuesto precursor en la formación de PCDD y PCDF. Otra hipótesis consiste en que los PCDD y PCDF se sintetizan en el mismo sistema de combustión mediante reacciones entre las ligninas (componente de la madera y el papel) y los compuestos de cloro derivados del policloruro de vinilo (PVC) o de compuestos inorgánicos como NaCl.

Sistemas para el control de la contaminación atmosférica

Las emisiones atmosféricas gaseosas y en partículas procedentes de los sistemas para la recuperación de recursos pueden controlarse en cinco clases de equipamientos:

- Precipitadores electrostáticos, filtros de mangas, filtros electrostáticos de lecho de grava (control de partículas)
- Separación en origen, controles de combustión, tratamiento de los gases de combustión (control de NO_x)
- Separación en origen, depuración húmeda o seca (control de SO₂ y gas ácido)
- Controles de combustión (control de CO y HC)
- Separación en origen, controles de combustión, control de partículas (control de la contaminación no específica).

Los dispositivos de control se seleccionan para conseguir la eficiencia de separación requerida, que se define como:

$$E = \frac{W_{\text{entrada}} - W_{\text{salida}}}{W_{\text{entrada}}} \cdot 100\%$$

donde:

E = eficiencia de separación, porcentaje

W_{entrada} = Peso de entrada del contaminante

W_{salida} = Peso de salida del contaminante

Equipamiento para controlar partículas. Las partículas finas (<10 μm) se controlan con tres tecnologías:

- Precipitadores electrostáticos (ESP), que funcionan bajo el principio de la atracción electrostática
- Filtros de mangas, que filtran mecánicamente las partículas a partir de la corriente del gas de combustión
- Filtros electrostáticos de lecho de grava, que combinan las características operacionales de los ESP y de los filtros de mangas.

Precipitadores electrostáticos. El precipitador electrostático (ESP) fue el primer dispositivo de control de partículas utilizado en las incineradoras de RSU que fue capaz de separar partículas finas (menores de 10 μm) y muy finas (menores de 2 μm). Funciona bajo el principio de la atracción electrostática (ver Figura 21). Un voltaje alto negativo, 20.000 a 100.000 voltios, aplicado a los electrodos de descarga, genera un fuerte campo eléctrico entre los electrodos de descarga y el colector. Las partículas en la corriente de gas adquieren una carga negativa mientras pasan a través del campo eléctrico. Por su carga, las partículas son atraídas hacia el electrodo colector con toma de tierra. Después de ser recogidas sobre las placas, las partículas se separan mediante la vibración mecánica de las placas.

La eficiencia de un ESP está en función de las características de los gases de combustión (especialmente temperatura y humedad) y de la resistividad eléctrica de las partículas. Normalmente la eficiencia de los ESP varía aproximadamente entre un 93 por 100 para partículas muy finas (menos de 2 μm). Aunque este rendimiento es impresionante, no cumple los requisitos de control de emisiones de algunos estados, tales como California, que han fijado unos requisitos más estrictos que las líneas directrices federales. Están desarrollándose nuevos diseños de ESP que consiguen eficiencias de separación de partículas comparables a las de los filtros de mangas.

Filtro de mangas. El filtro de mangas es la tecnología elegida para la mayoría de las incineradoras de RSU recientemente construidas en Estados Unidos. El filtro de mangas es un dispositivo intrínsecamente sencillo (ver Figura 22). Las bolsas de filtrar se conectan paralelamente sobre una estructura. Las partículas del gas de combustión son atrapadas en una capa de polvo que gradualmente se va acumulando sobre la superficie de la manga. La capa de polvo permite que la manga filtre partículas tan pequeñas como 0.1 μm , mucho más pequeñas que los espacios abiertos de 50 a 75 μm entre las fibras de la manga. Mientras las partículas se acumulan sobre la superficie de la manga, aumenta gradualmente la

caída de presión sobre el filtro de mangas. Las partículas se separan de las bolsas de filtrar mediante muchas técnicas, incluyendo: agitación mecánica, inversión de la corriente de aire y chorro pulsante. En la Figura 22 se ilustra una instalación con filtro de mangas.

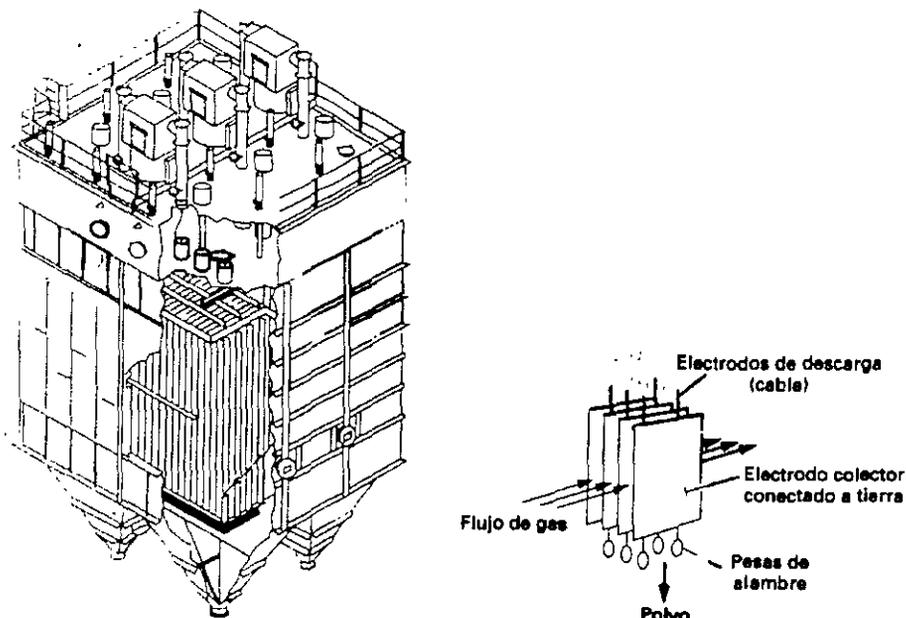


FIG. 21. PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO PARA LA SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS DE INCINERADORAS DE RSU

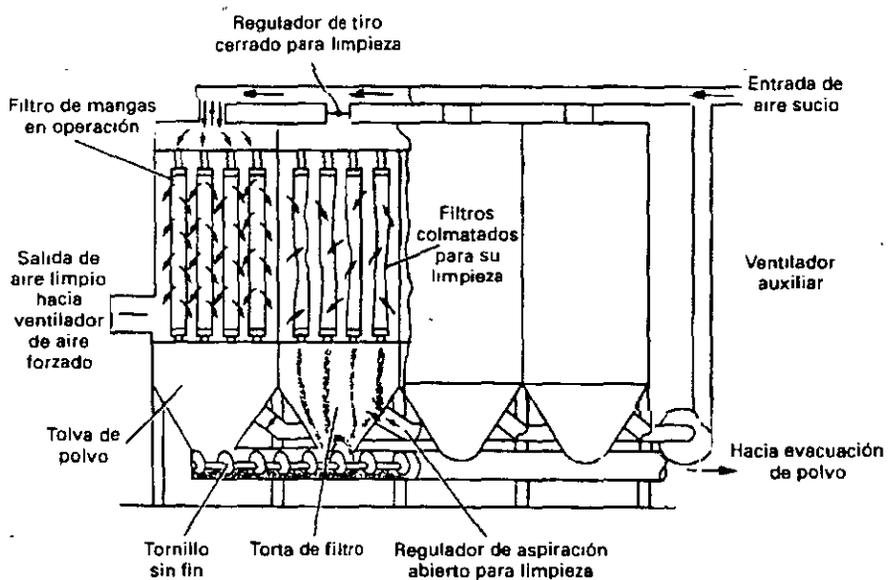


FIG. 22. FILTRO DE MANGAS PARA LA SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS DE INCINERADORAS DE RSU

Los parámetros de diseño más importantes para un filtro de mangas son el área, el material y el método de limpieza del filtro. En las aplicaciones de incineración de RSU se han utilizado con éxito diversos materiales como filtros de mangas, éstos incluyen: de vidrio, tejido de vidrio y Teflón™. El rendimiento de los filtros de mangas en las nuevas instalaciones ha sobrepasado las más estrictas líneas directrices estatales. Los filtros de mangas instalados en 12 de 13 incineradoras de RSU, que fueron probados durante el período 1986-1987, lograron una tasa de emisión de partículas menor que los 0,01 granos/dscf requeridos por algunos estados, como California.

Filtro electrostático de grava. El filtro electrostático de grava es un dispositivo híbrido que emplea la filtración mecánica y la atracción electrostática. Esta tecnología se ha empleado en hornos que queman madera y, más recientemente, en la incineradora de RSU de Pittsfield, Massachusetts. Se ha constatado una tasa de emisión de partículas de 0,035 granos/dscf.

Equipamiento para el control de NO_x. El NO_x combustible, formado mediante reacciones entre oxígeno y nitrógeno orgánico en el combustible, y el NO_x térmico, formado mediante reacciones entre el nitrógeno y el oxígeno en el aire utilizado para la combustión, son las dos principales fuentes de NO_x en la incineración. La separación en origen de RSU para separar fuentes de nitrógeno orgánico, tales como comida y residuos de jardín, del flujo de residuos antes de la incineración podrían utilizarse para controlar el NO_x combustible.

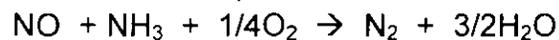
El control del NO_x térmico se puede conseguir mediante controles de combustión y el tratamiento de los gases de combustión. Los controles de combustión incluyen:

- Recirculación del gas de combustión
- Funcionamiento con bajas cantidades de aire en exceso e incineración por etapas.

En la recirculación de los gases de combustión una porción de los gases de escape de la incineradora se devuelve junto al aire de combustión del horno. El funcionamiento con bajas cantidades de aire en exceso y la incineración por etapas implican un cuidadoso control de la entrada de aire a la incineradora, mediante la división de aire de combustión en corrientes primarias y secundarias. Por lo tanto, parte del horno funciona con aire limitado o en gasificación y el resto del horno funciona con aire en exceso, reduciendo así la cantidad de NO_x térmico formado en el horno. Como los gasificadores se diseñan para operar de esta forma, tiene emisiones de NO_x intrínsecamente bajas.

Dos tecnologías utilizadas para tratar los gases de combustión incluyen la reducción catalítica selectiva (RCS) y la reducción no catalítica selectiva (RNCS).

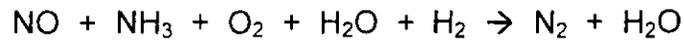
Reducción catalítica selectiva. La reducción catalítica selectiva emplea la inyección de amoníaco en los gases de chimenea, seguido por el paso del gas sobre un lecho catalizador. La reacción siguiente se produce en el intervalo de temperatura de 280 a 430°C:



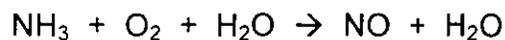
Se han empleado como catalizadores metales base como cobre, hierro, cromo, níquel, molibdeno, cobalto y vanadio, en diversas formas (granulares, cilíndricas, mallas). La tecnología es bastante eficaz, consiguiendo reducciones de hasta el 90 por 100 en aplicaciones en las que se queman carbón y aceite. El proceso todavía no se ha aplicado a la incineración de RSU por la sensibilidad de los catalizadores a la contaminación por partículas y al envenenamiento por plomo.

Reducción no catalítica selectiva. La reducción no catalítica selectiva ha sido desarrollada comercialmente por Exxon Research and Engineering Company, que licencia el proceso como Proceso Térmico DeNO_xTM. Funcionando en más de 60 instalaciones, el proceso se basa en la inyección de amoníaco, pero no hay ningún

catalizador implicado. El amoníaco se inyecta directamente al horno. Cuando se inyecta amoníaco en un horno en el rango de temperatura de 700 a 1.200°C, predomina la siguiente reacción aproximada:



Si no se añade H₂, el límite inferior de temperatura de la reacción dada en la ecuación anterior es 870°C. Con temperaturas por encima de 1.200°C predomina la reacción aproximada dada en la ecuación siguiente. El proceso debe controlarse muy cuidadosamente porque la producción extra de NO sería contraproducente.



El proceso es mecánicamente sencillo, como se puede ver en la Figura 23. El control de la temperatura del proceso se consigue instalando inyectores múltiples de pared en el horno, para que el NH₃, pueda inyectarse en una zona del horno dentro del rango de temperatura óptimo. Se han conseguido eficiencias de separación del 50 al 80 por 100.

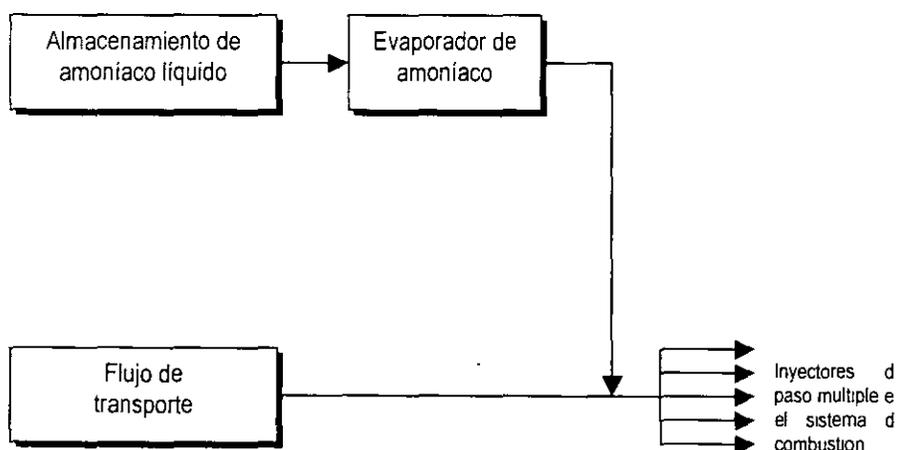


FIG. 23. ESQUEMA DEL PROCESO TÉRMICO DeNO_x™ PARA CONTROLAR LAS EMISIONES DE NO_x.

Equipamiento para controlar gases ácidos. Las emisiones incontroladas de la incineración de RSU pueden contener ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂). Los ácidos clorhídrico y fluorhídrico se emiten como aerosoles finos, y los dióxidos de nitrógeno y azufre se emiten en forma de gas que se combinan con las gotas de agua en la atmósfera para formar lloviznas de ácido nítrico y ácido sulfúrico. Estas lloviznas ácidas pueden producir una reducción en la visibilidad, la corrosión de metales y nieblas y lluvias ácidas. Existen varios métodos para controlar los gases ácidos, incluyendo:

- La separación en origen de los residuos que contienen cloro y azufre
- La depuración húmeda de los gases de combustión, en la que se utilizan disoluciones líquidas para depurar y neutralizar los gases ácidos
- Depuración seca, en la que se inyectan pastas húmedas neutralizantes directamente en la corriente de gas de combustión.

Separación en origen. Un método para controlar las emisiones de HCl y SO₂ es la separación en origen de los componentes de los residuos que contienen grandes cantidades de cloro y azufre, como pueden ser los plásticos. La separación de estos residuos tenderá a reducir el contenido energético de los residuos restantes. El contenido en cloro y azufre para diversos componentes de residuos se lista en la Tabla 8. La separación en origen de plásticos, residuos de jardín y diversos orgánicos parece ofrecer un gran potencial para la reducción de HCl, SO₂ y la porción de NO₂ combustible. Sin embargo, todavía no se ha demostrado la efectividad de este acercamiento.

Depuración húmeda. La depuración húmeda se ha utilizado ampliamente en Europa y Japón. Por ejemplo, en Kiel, Alemania, se utiliza la depuración húmeda con una solución de cal en un lavador venturi en una incineradora de RSU. Como se muestra en la Figura 24, el sistema es bastante complejo y está formado por un lavador venturi y un desvaporizador, un apagador de cal y un filtro prensa para

deshidratar los lodos de la depuradora antes de su evacuación. También forma parte del sistema un intercambiador de calor, que primero enfría los gases de combustión hasta 32°C antes de la depuradora y después recalienta los gases antes de ser evacuados por la chimenea. El paso de enfriamiento se requiere para incrementar la eficiencia de la operación de depuración, y el paso de recalentamiento se requiere para incrementar la fuerza ascendente de las emisiones. El rendimiento del sistema tiene una separación media de HCl del 89 al 98 por 100; de HF, del orden del 84 al 96 por 100, y una separación de SO₂, del 55 al 97 por 100.

TABLA 8
CONTENIDO DE AZUFRE Y CLORO DE LOS MATERIALES RESIDUALES ENCONTRADOS EN LOS RSU

Material	Contenido de azufre, porcentaje del peso seco	Contenido de cloro, porcentaje del peso seco
Cartón	0,05	0,05
Papel de periódico	0,03	0,05
Residuos de jardín	0,07	0,34
Goma, madera, textiles, etc.	0,18	0,14
Plástico	0,27	6,48
Papel mezclado	0,04	0,12
Orgánicos misceláneos	1,15	1,8

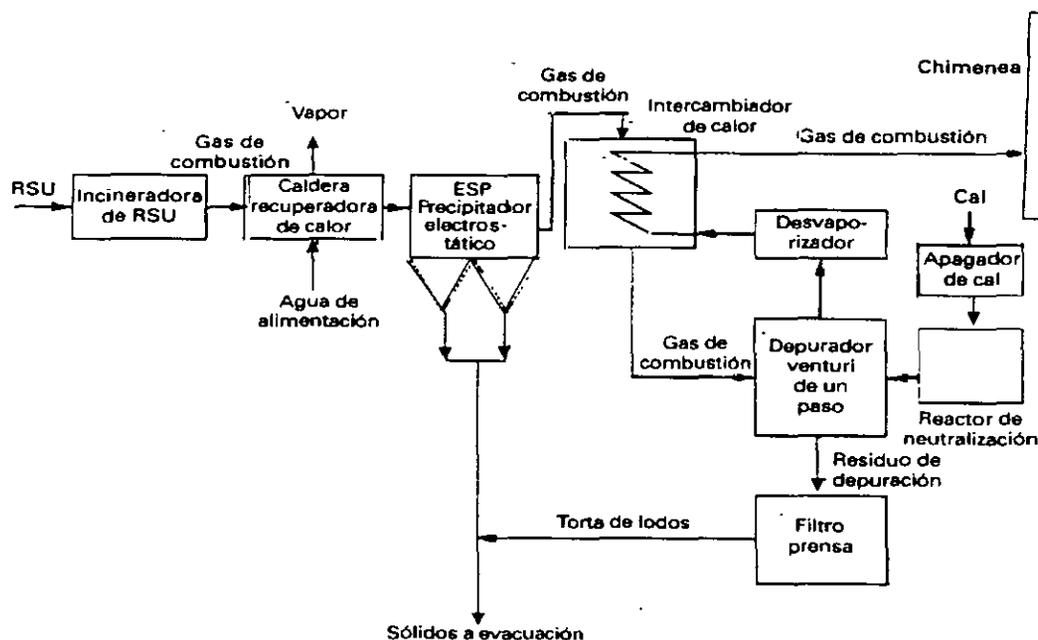


FIG. 24. DIAGRAMA DE FLUJO DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN HÚMEDA UTILIZADA CONJUNTAMENTE CON LA INCINERADORA DE RSU EN KIEL, ALEMANIA, PARA EL CONTROL DE GASES ÁCIDOS Y SO₂

Depuración seca. Los sistemas de depuración seca son otro método de tratamiento de gases ácidos. Se utilizan dos técnicas:

- Secado de rocío
- Inyección en seco

En la Figura 25 se muestra un sistema típico de secado de rocío. Se bombean disoluciones de carbonato de sodio y de cal en el desecador de rocío, donde reaccionan con los gases de combustión. Los gases ácidos y el SO_2 son adsorbidos sobre la superficie de las gotas, reaccionando para formar sales neutras tales como sulfato de calcio (CaSO_4), cloruro de calcio (CaCl_2), sulfato de sodio (Na_2SO_4) y cloruro de sodio (NaCl). Más adelante en el sistema se separan las partículas sólidas de sal, así como las cenizas volantes que aún están en los gases de combustión, mediante un filtro de bolsas. La eficiencia de separación del SO_2 para un combinado depuradora seca/filtro de bolsas es bastante alta, acercándose al 98 por 100.

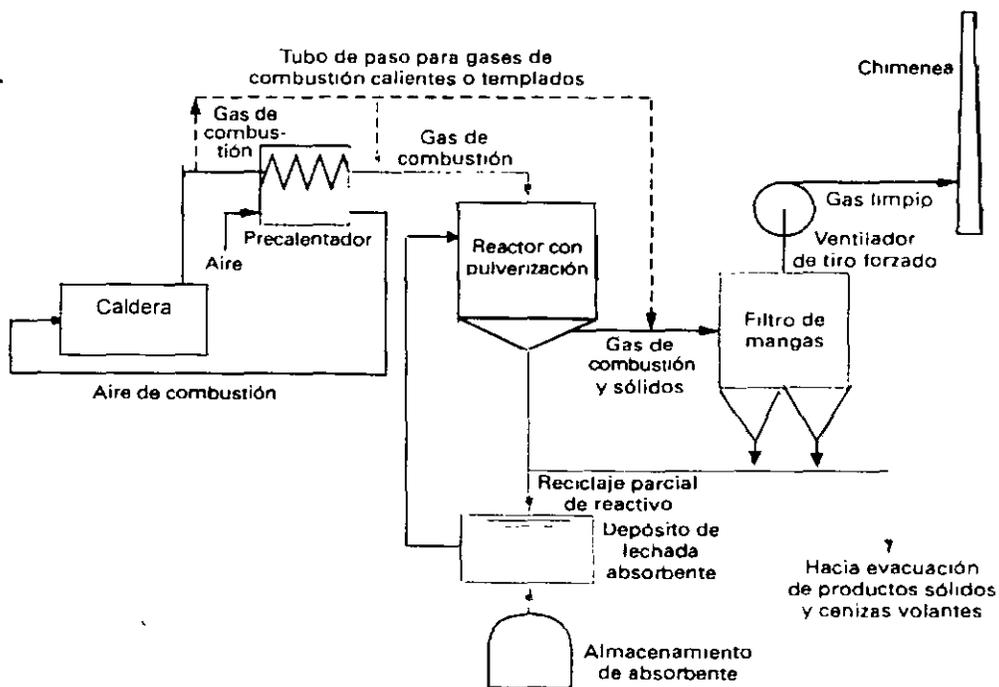


FIG. 25. DIAGRAMA DEL FLUJO DE UNA DESECADORA DE ROCÍO PARA LA SEPARACIÓN DE GASES ÁCIDOS Y SO_2 .

El otro sistema de depuración seca es la inyección en seco, como en el Teller Dry Scrubbing System™. Como se puede ver en la Figura 26, se rocía una solución de cal en la cámara de reacción, neutralizando los gases ácidos. El agua en la disolución se evapora completamente, de forma que no hay todos líquidos que tratar. Se añade un agente aglomerante patentado, Tesisorg™, a la corriente del gas de combustión después de la cámara de inmersión para ayudar a la coagulación de las partículas muy finas, antes de su recolección en el filtro de bolsas. Para el sistema Teller han sido constatadas eficiencias de separación, para HCl y SO₂ de hasta el 99 por 100.

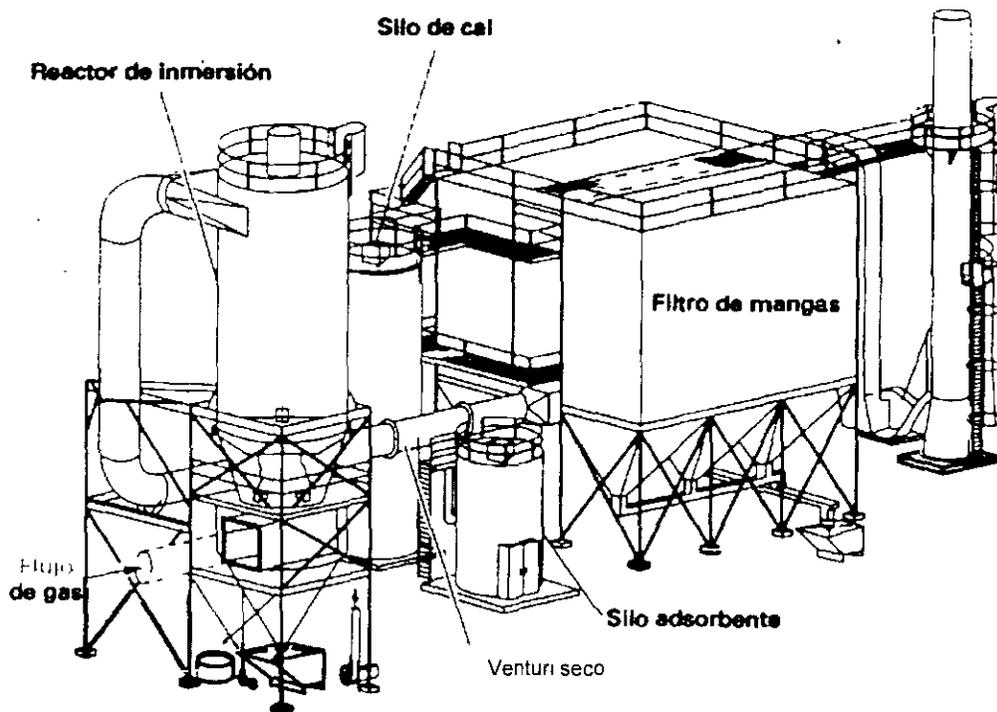


FIG. 26. SISTEMA DE DEPURADORA SECA TELLER PARA GASES ÁCIDOS Y SO₂. SE INYECTA TESISORB™, UN POLVO CRISTALINO CON UN RANGO DE TAMAÑO ESPECÍFICO, U OTRO AGENTE, Y SE MEZCLA EN EL VENTURI SECO ANTES DEL FILTRO DE BOLSAS.

Equipamiento para el control de CO y HC. El control del monóxido de carbono (CO) y de los hidrocarburos (HC) está directamente relacionado con la eficiencia de la incineración y está en función del diseño y de la operación del sistema. La formación de CO y HC se produce por la incineración incompleta de los residuos, debido a una incineración rica en combustible (sobrecarga del horno) y a la insuficiencia de temperatura provocada por el alto contenido en humedad de los residuos. El uso de oxígeno adicional es la primera herramienta para controlar la producción de CO y HC. El oxígeno adicional se debe equilibrar para evitar una combustión a temperatura demasiado alta y la generación de excesivas emisiones de NO_x. El equilibrio de estos factores en incineradoras modernas de RSU se lleva a cabo mediante la supervisión continua de las emisiones (SCE) de los constituyentes del gas de combustión (CO, CO₂, NO_x, HC y O₂). Las lecturas de CO y O₂ se utilizan para equilibrar el aire en exceso. También se utilizan las lecturas de temperatura en las partes cruciales del horno para ayudar en el control. Los sistemas sofisticados de presentación de datos informatizados y de instrumentación de control se utilizan para ayudar a los operadores a conseguir un funcionamiento eficiente.

En los sistemas de incineración en bruto, es crucial la habilidad del operador de la grúa para cargar la cámara de combustión con el fin de conseguir una combustión óptima, porque el operador de la grúa tiene que mezclar los residuos antes de la carga para minimizar las cantidades desiguales de combustible y debe mantener un flujo de combustible hacia la unidad de combustión tan uniforme como sea posible. Los sistemas que funcionan con CDR pueden estar más automatizados, por la calidad más uniforme del flujo de residuos. La calidad uniforme del combustible simplifica el papel del operador que alimenta de residuos al sistema.

Equipamiento para el control de dioxinas, furanos y metales. Algunos de los contaminantes no clasificados más importantes en la incineración de RSU incluyen dioxinas, furanos y metales. Existen varias tecnologías para facilitar su control, incluyendo la separación en origen, los controles de combustión y el control de

partículas. Como se argumentó anteriormente, la separación en origen puede ser una medida eficaz para limitar las emisiones de metales pesados producidas por la incineración de RSU. La separación en origen de pilas ya se usa en Japón y Suecia para controlar las emisiones de mercurio y cadmio.

El uso de la separación en origen para controlar las dioxinas y furanos es más problemática. Aunque se ha recomendado la separación de los residuos que contengan cloro, principalmente plásticos, como medida de control, la evidencia experimental hasta la fecha no ha probado que sea eficiente. En unas pruebas recientes en la incineradora de Pittsfield, Massachusetts, se hicieron unos ensayos con muestras <<tocada>> de RSU que contenían cantidades extras de policloruro de vinilo (PVC). Aunque se generaba más gas HCl, no se encontró una correlación entre PVC y HCl y las concentraciones de dioxinas y furanos.

Los controles de combustión son la estrategia de control principal para reducir las emisiones de dioxinas y furanos. Se ha constatado que existe una fuerte correlación entre la temperatura, el tiempo de residencia y las emisiones de dioxinas y furanos. La Junta de California de Recursos Atmosféricos recomienda temperaturas mínimas en los sistemas de procesamiento térmico de $1.800^{\circ}\text{F} \pm 190^{\circ}\text{F}$ con un tiempo de residencia mínimo de 1 segundo. También se ha constatado que las condiciones que minimizan la generación de CO minimizan también la generación de dioxinas y furanos. Por tanto, se puede usar el CO como un sustituto para supervisar las emisiones de dioxinas y furanos. La técnica de supervisión es significativa porque se puede medir el CO en tiempo real con sistemas de supervisión continuos. Actualmente no se pueden medir las dioxinas y furanos en una base continua.

También es importante el control de partículas para controlar las emisiones de metales y de dioxinas y furanos. Se ha comprobado que los óxidos y cloruros metálicos tenderán a condensarse sobre partículas submicrónicas de cenizas volantes a temperaturas por debajo de 500°F . El sistema más eficiente para

separar las partículas submicrónicas es el filtro de bolsas correctamente diseñado y, por lo tanto, es el método más eficiente y constante para controlar los metales. El mercurio, por su baja temperatura de volatilización, no se separa eficientemente con este mecanismo. La forma más eficiente de controlar el mercurio sigue siendo la separación en origen.

Existen evidencias de que las dioxinas y furanos pueden capturarse en la capa de polvo de los filtros de bolsas y en las depuradoras húmedas y secas utilizadas para controlar SO₂, si se mantienen las temperaturas por debajo de 140°C, permitiendo así la condensación de las dioxinas y furanos. Sin embargo, los resultados hasta la fecha no han sido suficientemente concluyentes para defender esta técnica como estrategia de control. Los controles de combustión siguen siendo la principal técnica para controlar las dioxinas y furanos.

Normativas de contaminación atmosférica

Bajo la autoridad del Acta del Aire Limpio, la Agencia para la Protección Ambiental (EPA) emitió Estandarizaciones de Rendimiento para las nuevas incineradoras de RSU y Líneas Directrices sobre Emisiones para incineradoras de RSU ya existentes en febrero de 1991. Con fines reglamentarios, las incineradoras de RSU (IRU) que comenzaron a construirse en o antes del 20 de diciembre de 1989 (la fecha en la que se publicaron las Normativas Preliminares en el Registro Federal para comentarios públicos) se consideran como IRU existentes.

IRU nuevas. Las Estandarizaciones de Rendimiento para las nuevas IRU se resumen en la Tabla 9. Actualmente las Estandarizaciones se aplican solamente a las IRU de capacidad superior a 250 t/d. Las Estandarizaciones se dividen en seis partes:

- Definición de buenas prácticas de combustión
- Límites de emisiones para orgánicos (dioxinas y furanos)
- Límites de emisiones para metales
- Límites de emisiones para gases ácidos

- Límites de emisiones para NO_x
- Requisitos de supervisión.

Las Estandarizaciones especifican también la mejor tecnología demostrada (MTD) para cumplir con los límites de emisiones.

TABLA 9
RESUMEN DE LAS NORMAS DE LA EPA PARA NUEVAS INCINERADORAS DE RSU

Aplicabilidad

Las New Source Performance Standards (NSPS) (Normativas sobre el Rendimiento de Nuevas Fuentes) se aplican a las incineradoras de residuos urbanos (IRU) con capacidades unitarias por encima de 225 Mg/día (250 t/día) que queman desechos domésticos, comerciales y/o desechos institucionales. Las NSPS no cubren los desechos industriales

Buenas Prácticas de Combustión (BPC)

Nivel máximo de carga demostrado durante los ensayos de rendimiento de dioxinas/furanos.

No puede exceder el 110 por 100 de la carga máxima demostrada, media de 4 horas.

La temperatura máxima a la entrada del dispositivo de control de las partículas no puede exceder de 17°C por encima de la temperatura máxima demostrada durante los ensayos del rendimiento de dioxinas/furanos.

Nivel de CO (tiempo medio) de la forma siguiente:

IRU con aire restringido y en exceso	50 ppmv (4 horas)	
IRU con pantalla de agua y refractarios de quemado en bruto		100 ppmv (4 horas)
IRU utilizando combustión de lecho fluidizado		100 ppmv (4 horas)
IRU con pantalla de agua rotatoria de quemado en bruto	Alimentadores de CDR	100 ppmv (24 horas)
IRU alimentadas por una mezcla carbón/CDR		150 ppmv (24 horas)

Certificación estatal o de la ASME para los supervisores de IRU. Formación de operario y manual de formación para el resto del personal de IRU.

Emisiones orgánicas de IRU (medidas en función del total de dioxinas/furanos)

Dioxinas/furanos	30 ng/m ³
Mejor Tecnología Demostrada (MTD)	Buenas prácticas de combustión (BPC) secador de rocío y filtro de tejido

Emisiones metálicas de IRU (medidas en función de MP)

Materia en partículas (MP)	34 mg/m ³ · N
Opacidad	10 por 100 (media de 6 minutos)
MTD	Secador de rocío y filtro de tejido

Emisiones de gases ácidos de IRU (medidas en función de SO₂ y HCl)

SO ₂	80 por 100 o 30 ppmv (24 horas)
HCl	Reducción del 95 por 100 o de 25 ppmv
MTD	Secador de rocío y filtro de tejido

Emisiones de óxidos de nitrógeno

NO _x	180 ppmv (24 horas diarias [bloque])
MTD	Reducción no catalítica selectiva

Requisitos de control

SO ₂	Sistema de supervisión continua de emisiones (SSCE), media Geométrica de 24 horas
NO _x	SSCE, media aritmética de 24 horas
Opacidad	SSCE, media de 6 minutos
CO, carga, temperatura	SSCE, media de 4 o 24 horas
MP, dioxinas/furanos y HCl	Ensayo anual de chimenea

IRU existentes. Las Líneas Directrices sobre Emisiones para las IRU existentes se resumen en la Tabla 10. Las Líneas Directrices contienen solamente cinco partes porque actualmente no se regulan las emisiones de NO_x. Sin embargo, las Enmiendas del Acta de Aire Limpio de 1990 permiten que EPA añada la regulación de NO_x a las IRU existentes en el futuro.

Las Líneas Directrices para IRU existentes son similares a las Estandarizaciones de Rendimiento para IRU nuevas, excepto que los límites de emisiones son menos estrictos. Por ejemplo, el límite de emisión para dioxinas y furanos en las IRU nuevas es 30 ng/dscm (nanogramos/metro cúbico estándar seco), mientras que el límite de emisiones para IRU existentes es 60 ng/dscm para IRU muy grandes (>1.100 t/d). La MTD también es diferente para las IRU existentes. Por ejemplo la MTD para controles de gases ácidos en una IRU muy grande existente es una desecadora de rocío y un precipitador electrostático, mientras que la MTD para una IRU nueva es una depuración seca y un filtro de bolsas.

Normativas estatales y locales. Los distritos de control para la contaminación atmosférica estatales y locales pueden emitir límites de emisiones que sean más estrictos que las normativas federales. Por ejemplo, las Líneas Directrices de California de 1991 para incineradoras de RSU, resumidas en la Tabla 11 son más estrictas que las regulaciones federales de 1991 en varios aspectos. Las publicaciones y congresos promocionados por las sociedades profesionales, tales como la Asociación para la Gestión del Aire y Residuos, también son una gran fuente de información actualizada.

Rechazos sólidos

Se producen varios tipos de rechazos sólidos en las instalaciones para la recuperación de recursos, incluyendo:

- Cenizas de fondo
- Cenizas volantes
- Productos de depuradora

TABLA 10
RESUMEN DE LAS DIRECTRICES SOBRE EMISIONES DE LA EPA PARA INCINERADORAS
EXISTENTES DE RESIDUOS URBANOS

Aplicabilidad

Las directrices se aplican a las IRU con capacidades por encima de 225 Mg/día (250 t/d), que incineran desechos domésticos, comerciales y/o institucionales. Los desechos industriales no se incluyen en las directrices. Las IRU con capacidades por encima de 250 t/d en plantas con una capacidad añadida >250 t/d pero ≤1.100 t/d (grande) y >1.100 t/d (muy grande) están sujetas a las siguientes disposiciones.

Buenas Prácticas de Combustión (BPC)

Nivel de carga máximo demostrado durante el ensayo de rendimiento dioxinas/furanos. No puede exceder el 110 por 100 de la carga máxima demostrada, media de cuatro horas.

La temperatura máxima en la entrada del dispositivo de control de la materia en partículas (MP) no puede exceder de 17°C por encima de la temperatura máxima demostrada durante los ensayos del rendimiento de dioxinas/furanos

Nivel de CO (tiempo medio) de la forma siguiente.

IRU con aire restringido y en exceso	20 ppmv (4 horas)
IRU con pantalla de agua y refractarios de quemado en bruto	100 ppmv (4 horas)
IRU utilizado combustión de lecho fluidizado	100 ppmv (4 horas)
IRU alimentadas por una mezcla carbón/CDR	150 ppmv (4 horas)
Alimentadores de CDR	200 ppmv (24 horas)
IRU con pantalla de agua rotatoria de quemado en bruto	250 ppmv (24 horas)

Certificación estatal o de la ASME para los supervisores de IRU. Formación de operario y manual de formación para el resto del personal de IRU.

Emisiones orgánicas de IRU (medidas en función del total de dioxinas/furanos)

Dioxinas/furanos	IRU muy grandes	60 ng/m ³ · N
	IRU grandes	125 ng/m ³ · N
Mejor Tecnología Demostrada (MTD)	IRU muy grandes	Buenas Prácticas de Combustión (BPC), secador de rocío y precipitador electrostático (ESP).
	IRU grandes	BPC, inyección de absorbente seco y ESP.

Emisiones metálicas de IRU (medida en función de MP)

Materia en partículas (MP)	IRU muy grandes	34 mg/m ³ · N
	IRU grandes	69 g/m ³ · N
Opacidad MTD	IRU muy grandes y grandes	10 por 100 (media de 6 minutos ESP)

Emisiones de gases ácidos de IRU (medidas en función de SO₂ y HCl)

SO ₂	IRU muy grandes	70 por 100 o 30 ppmv (24 horas)
	IRU grandes	50 por 100 o 30 ppmv (24 horas)
HCl	IRU muy grandes	Reducción del 90 por 100 o 25 ppmv
	IRU grandes	Reducción del 50 por 100 o 25 ppmv
SO ₂		Sistema de supervisión continua de emisiones (SSCE), media geométrica de 24 horas
Opacidad		SSCE, media de 6 minutos
CO, carga, temperatura		SSCE, media de 4 o 24 horas
MP dioxinas/furanos y HCl		Ensayo anual de chimenea

La gestión de estos rechazos sólidos es una parte esencial del diseño y de la operación de una instalación para la recuperación de recursos.

TABLA 11
DIRECTRICES DE CALIFORNIA EN 1991 PARA LA INCINERACIÓN DE RSU

Item	Unidad	Valor
SO ₂	ppmv	30
NO _x (como NO ₂)	ppmv	30-50
CO	ppmv	50-100
THC (como CH ₄)	ppmv	1-10
HCl	ppmv	25
Total de partículas en suspensión	g/m ³ · N	0,023
Partículas (<2 μm)	g/m ³ · N	0,018

Cenizas de fondo. La porción no quemada y no quemable de los RSU se conoce como cenizas de fondo. En una instalación de quemado en bruto, las cenizas de fondo pueden contener cantidades considerables de metales y vidrio, así como orgánicos no quemados. Hay menos metal y vidrio en las cenizas de fondo procedentes de instalaciones que queman CDR, porque la mayor parte de estos materiales ya se han separado del flujo de residuos. La cantidad de materia orgánica no quemada en las cenizas es una medida del rendimiento de la instalación. Puede estimarse utilizando el Índice de Quemado de Cenizas (ABI).

$$ABI = \left[1 - \frac{(a-b)}{a} \right] \cdot 100\% \quad (13.11)$$

Donde:

a = Peso original de la muestra de cenizas.

b = Peso de la muestra de cenizas después de quemarlas en un horno de mufla.

Una incineradora de RSU bien operada debería ser capaz de lograr un Índice de Quemado de Cenizas del 95 al 99 por 100.

Las cenizas de fondo de la mayoría de las incineradoras de RSU en Estados Unidos se colocan en los vertederos, sin procesamiento. Se pueden recuperar los metales y otros materiales a partir de las cenizas de fondo mediante la separación magnética y el cribado. El problema es encontrar un mercado para los materiales. Por ejemplo, en Holanda es una práctica común utilizar las cenizas de fondo para el mantenimiento de diques. Las cenizas de fondo también se han utilizado con éxito para la construcción de capas base en las carreteras de Estados Unidos. Algunos investigadores han constatado éxitos con el uso de mezclas de cenizas de fondo, cenizas volantes, cal hidratada y cemento Portland para fabricar bloques de construcción convencional, se ha propuesto su utilización para arrecifes artificiales.

Cenizas volantes. A medida que se incrementa la eficiencia de los sistemas para controlar la contaminación atmosférica, se separan mayores cantidades de partículas, o cenizas volantes, de los gases de combustión. Eficiencias de separación de partículas que exceden del 99 por 100 son comunes con los sistemas modernos ESP y con filtros de bolsas. Las cenizas volantes resultantes son otro rechazo sólido que hay que gestionar.

Como las cenizas volantes están compuestas por partículas micrónicas y submicrónicas, que se han recogido con los sistemas para controlar la contaminación atmosférica, se deben manejar con mucho cuidado para evitar emisiones fugitivas de polvo que puedan ser dañinas para los trabajadores y el ambiente circundante. Las cenizas volantes deberían separarse de los dispositivos de recolección con transportadoras neumáticas y ser transportadas en contenedores cerrados hasta un lugar aceptable para su evacuación. Cuando las normativas locales lo permitan, las cenizas volantes también se pueden humedecer y mezclar con las cenizas de fondo antes de su evacuación.

Productos de depuradora. Los productos de la depuradora son los lodos producidos en una depuradora húmeda utilizada para la separación de SO_2 y

gases ácidos. Los productos de la depuradora son sales de sulfato de calcio y sodio formadas en la reacción de depuración como los orgánicos en cantidades traza y los metales pesados. La gestión de los productos de la depuradora incluye la deshidratación, para reducir el volumen, y la evacuación subsiguiente de los lodos en forma de rechazo sólido y del sobrenadante en forma de aguas residuales.

Metales pesados y orgánicos en cantidades traza. Es bien conocido que las cenizas de la incineración de RSU contienen cantidades traza de metales pesados y orgánicos. Por lo tanto, los rechazos sólidos deben gestionarse cuidadosamente para proteger al público del contacto con estos materiales. La inquietud principal se centra en el vertido de la ceniza, que bajo ciertas condiciones puede lixivarse a las aguas subterráneas. Los elementos preocupantes incluyen: arsénio (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg), selenio (Se) y plata (Ag).

Se han utilizado diversos ensayos para valorar el potencial de lixiviado de las cenizas, incluyendo:

- El Ensayo EP de Toxicidad
- El Ensayo Procedimiento para las Características Tóxicas del Lixiviado (TLCP).

En el Ensayo EP de Toxicidad se lixivia una mezcla del 5 por 100 de cenizas y del 95 por 100 de RSU con una disolución ácida en una columna de ensayo. La intención del ensayo es simular la producción de lixiviados en un vertedero de residuos mezclados en el que están presentes ácidos orgánicos producidos por la descomposición biológica de orgánicos. En el ensayo TLCP, se trituran muestras de cenizas $\leq 9,5$ mm mezcladas con una solución amortiguadora de acetato con un pH 5, mezclándolo durante 18 horas. Después se filtra el sobrenadante y se analizan los metales pesados. La validez de los ensayos es un asunto en

investigación y se están llevando a cabo diversos estudios para encontrar una correlación, si existe, entre los resultados de los ensayos y los lixiviados reales de cenizas en vertederos en explotación.

Procedimientos recomendados para la manipulación de cenizas. La buena práctica ingenieril para la gestión de las cenizas procedentes de la incineración de RSU se puede resumir de la forma siguiente:

- Manipulación: se deben humedecer correctamente las cenizas o cubrirlas para que no se produzcan emisiones fugitivas de polvo.
- Transporte: los contenedores de camiones deberán estar cubiertos y a prueba de fugas.
- Evacuación de cenizas volantes (solamente): la evacuación normalmente deberá ser en un monovertedero (sólo cenizas) equipado con recubrimientos dobles y un sistema para la recolección de los lixiviados.
- Combinado o solamente cenizas de fondo: la evacuación normalmente deberá ser en un monovertedero equipado con un recubrimiento mixto o de arcilla, o mediante la evacuación conjunta en un vertedero de RSU equipado con un doble aislamiento. Algunos diseñadores también incluyen instalaciones para la recuperación de gas para controlar la emisión de olores, causados por la descomposición de la materia orgánica parcialmente incinerada.

La política sobre evacuación de residuos sólidos es dinámica. Se deben consultar con EPA y las agencias locales y estatales apropiadas para las normas y guías actuales.

Descargas de aguas residuales

Las descargas de aguas residuales tienen diversos orígenes dentro de las plantas para la recuperación de recursos, incluyendo:

- Agua de limpieza y enfriamiento de los sistemas para la separación de cenizas húmedas
- Efluente de depuradoras húmedas procedente del equipamiento para la separación de ácidos y SO₂
- Aguas residuales de sellado y mantenimiento en general
- Aguas residuales de aguas de alimentación
- Purgas de la torre de enfriamiento.

Estas últimas dos fuentes están relacionadas con el sistema de generación de energía eléctrica y son comunes a cualquier estación térmica que utilice turbinas de vapor. Comparadas con el lixiviado que se produce en un vertedero, las cantidades de aguas residuales producidas son relativamente menores, pero pueden requerir algún pretratamiento antes de ser vertidas al sistema de alcantarillado municipal.

Aguas residuales de la separación de cenizas. Se pueden manipular tanto las cenizas húmedas como las secas. Los sistemas más comunes utilizan agua para templar y enfriar las cenizas antes de evacuarlas, y para controlar las emisiones fugitivas de polvo. Si las cenizas se evacúan fuera del lugar, el agua del templado se evacua con las cenizas y no se producen aguas residuales. El contenido en agua de las cenizas preocupa cuando finalmente se vierten las cenizas. En algunos sistemas se reciclan las cenizas de fondo para formar capas de base para carreteras. Las cenizas de fondo se pueden lavar para separar fácilmente los contaminantes disueltos, como cloruros y sulfatos.

Efluente de la depuración húmeda. La depuración húmeda es un método eficiente para el tratamiento del SO₂ y para la separación de gases ácidos. Sin embargo, se producen dos productos residuales: rechazo sólido (producto de la depuradora) y agua residual (efluente de la depuración húmeda). El tratamiento consiste en: neutralización, precipitación y sedimentación. En Bamberg, Alemania, la descarga del efluente de la depuradora excedió los valores límite alemanes para

el mercurio (0,05 mg/l). La precipitación con trimercaptotriacina ($C_3N_3S_5$) redujo los niveles de mercurio en el efluente hasta 0,045 mg/l. En Kiel, Alemania, está instalándose un tipo alternativo de depuradora húmeda en la incineradora de RSU. Los lodos de la depuradora serán deshidratados en un filtro de prensa y secados en evaporadoras multiefecto utilizando calor residual de la incineración de los RSU, eliminando así las aguas residuales del sistema.

Aguas residuales de sellado y mantenimiento general. Se generan pequeñas cantidades de aguas residuales por el agua utilizada para sellar y enfriar bombas y otros equipamientos. El agua de refrigeración y sellado a veces se contamina con aceites y grasas. El agua de limpieza utilizada para lavar las zonas de descarga también es preocupante, porque contienen orgánicos de los RSU. Normalmente las aguas residuales se sedimentan antes de ser vertidas a las alcantarillas municipales.

Aguas residuales de aguas de alimentación. El agua utilizada para fabricar vapor en un sistema de turbina de vapor debe cumplir los requisitos más estrictos de calidad de agua para sólidos totales disueltos (SDT), pH y alcalinidad. Cumplir con estos requisitos requiere que los sistemas para el tratamiento de aguas de alimentación sean utilizados para las aguas de fuentes urbanas o de pozos in situ. Los sistemas típicos de tratamiento pueden emplear una combinación de unidades de ablandamiento de aguas, intercambio iónico, precipitación y ósmosis inversa. Las descargas de estos sistemas pueden regularse mediante normativas locales y estatales sobre descargas.

Purgas de torres de enfriamiento. Otra descarga de aguas relacionada con la producción de energía es la purga de torres de enfriamiento. Las torres de enfriamiento se utilizan para condensar el vapor en agua después de pasar el vapor por las turbinas de vapor. Esencialmente son intercambiadores de calor, en los que el vapor en el ciclo cerrado de vapor se enfría mediante una mezcla gota

de agua/aire en un circuito separado. El agua del circuito de enfriamiento se recircula sobre listones de madera u otro relleno dentro de la torre enfriadora.

Normalmente se utilizan sales de cromo para retrasar el crecimiento de algas dentro de la torre que reducen la eficiencia del enfriamiento. Mientras se recircula el agua de enfriamiento, está poco a poco se evapora, incrementando el contenido total de sólidos disueltos y de cromo. Periódicamente hay que cambiar el agua, produciéndose un efluente llamado purga. Como el agua tiene un alto contenido en sólidos disueltos y sales de cromo, puede requerir un pretratamiento mediante ósmosis inversa o precipitación antes de arrojarla a las alcantarillas municipales. Afortunadamente, los sistemas de generación de energía utilizados con incineradoras de RSU son relativamente pequeños, 10 a 50 MW, comparados con los 500 a 1.000 MW de una planta térmica típica, donde la purga de las torres enfriadoras es un problema importante.

7. SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Una vez que los residuos sólidos han sido convertidos en energía térmica en forma de vapor mediante la incineración, o en energía química en forma de gases o líquidos mediante la pirólisis o la gasificación, se pueden convertir en energía mecánica o eléctrica. El vapor puede utilizarse directamente en procesos industriales o para calefacción de edificios. El vapor puede usarse también para la producción de energía mecánica o eléctrica mediante una turbina de vapor. Los gases y líquidos producidos a partir de residuos sólidos mediante procesos biológicos y térmicos pueden emplearse para alimentar calderas de producción de vapor. Los gases y líquidos pueden utilizarse también para alimentar motores recíprocos y turbinas de gas. Los propósitos de esta parte son tres:

- Presentar los diagramas de flujo básicos disponibles para conseguir estas conversiones.

- Presentar los datos sobre eficiencia de los componentes utilizados en los diversos diagramas de flujo de procesos de conversión
- Ilustrar el uso de los datos en el cálculo de la eficiencia de producción de energía.

Diagramas de flujo sobre recuperación de energía

Los componentes principales utilizados para la recuperación de la energía son: calderas para la producción de vapor; turbinas de vapor; turbinas de gas y motores recíprocos como motores primarios para la energía mecánica, y generadores eléctricos para la conversión de energía mecánica en electricidad. Las turbinas de vapor se utilizan en sistemas grandes (10 a 50 MW) y las turbinas de gas y los motores recíprocos se utilizan en los sistemas más pequeños. En la Figura 27 se muestran diagramas de flujo para la recuperación de energía.

Sistemas con turbinas de vapor. El sistema más común de recuperación de energía para la producción de electricidad es el sistema con turbina de vapor. Como se puede observar en la Figura 27a, el vapor se produce en una caldera de quemador (RSU o CDR) (también pueden utilizarse productos de conversión gaseosos o líquidos). El vapor se usa para mover una turbina de vapor y después se condensa de nuevo en agua de alimentación. La turbina de vapor alimenta un generador eléctrico, que suministra energía in situ y energía en exceso para exportar. El sistema es esencialmente una versión a escala más pequeña de una planta térmica alimentada por carbón o gas.

Sistema de generador con turbina de gas. Las turbinas de gas requieren combustibles gaseosos o líquidos. Estos combustibles pueden suministrarse mediante procesos biológicos, gas de vertedero o digestión anaerobia de RSU, o mediante pirólisis o gasificación. Como se puede observar en la Figura 27b, una turbina de gas es similar a un motor a reacción, que consiste en un compresor para incrementar la densidad de la mezcla gas/aire, un combustor y una turbina para convertir los gases calientes de combustión en energía mecánica. El

generador eléctrico se conecta directamente al eje de salida de la turbina de gas. Las turbinas de gas son eficientes y compactas y se utilizan ampliamente en los sistemas de gas de vertedero.

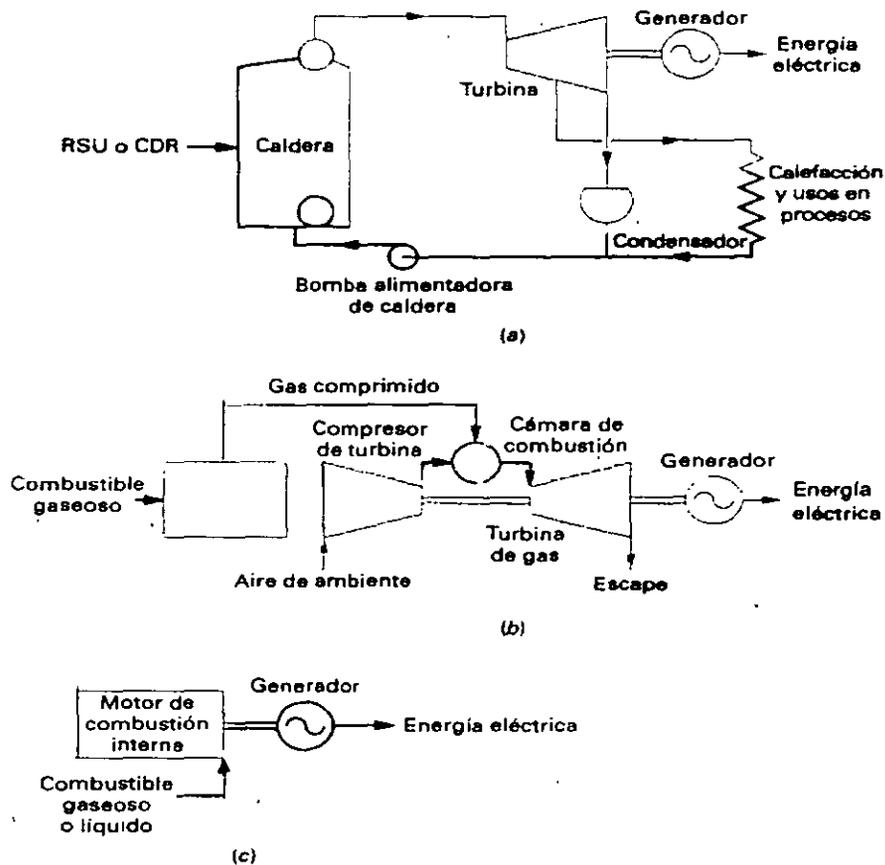


FIG. 27. DIAGRAMAS DE FLUJO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA. (a) UTILIZANDO TURBINA DE VAPOR, (b) UTILIZANDO TURBINA DE GAS Y (c) MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Sistemas con motor de combustión interna. Los motores de combustión interna que utilizan pistones y cigüeñal son una alternativa a las turbinas de gas para combustibles gaseosos y líquidos del procesamiento térmico o biológico de residuos sólidos (ver Figura 27c). Los motores son versiones modificadas de motores industriales diseñados para gas natural o propano. Como el gas natural

tiene un poder calorífico de unos 37.000 kJ/m³ comparado con los 16.000-18.000 kJ/m³ para el gas de vertedero y 6.000-12.000 kJ/m³ para el gas de poder calorífico, los motores utilizan carburadores y distribuidores de admisión modificados para manejar el gas de más baja calidad. Los motores de combustión interna son los generadores de energía más comunes utilizados en los sistemas para la recuperación del gas de vertedero.

Sistemas de cogeneración. Cogeneración se define como la generación simultánea útil de energía térmica y eléctrica. Los sistemas de cogeneración son utilizados ampliamente en la industria para generar electricidad y calor para procesos o de calefacción a la vez. Las aplicaciones para la recuperación de energía de residuos sólidos son limitadas por el requisito que hace necesario que el uso del calor recuperador se localice en el mismo lugar que el sistema de generación de energía. Existen varios diagramas posibles de flujo de cogeneración (ver Figura 28). En sistemas con turbina de vapor, el vapor para calefacción se genera mediante la extracción de parte del vapor desde las etapas de baja presión de la turbina de vapor (ver Figura 28a). En sistemas de turbina de gas, se puede añadir una caldera de calor residual para generar vapor desde la corriente de escape del gas caliente de la turbina (ver Figura 28b). En sistemas de motor de combustión interna, el calor se puede recuperar con radiadores especiales y envolturas de enfriamiento de escape (ver Figura 28c).

Tasas de calor de elaboración

En la producción de energía eléctrica la práctica común es considerar la eficiencia global de la conversión en términos de tasa de calor, como se expresa en la ecuación siguiente:

$$\text{Tasa de calor (kJ/KWh)} = \frac{\text{Calor suministrado en combustible}}{\text{Energía generada (KWh)}}$$

Cuando se utiliza esta ecuación, es importante recordar que el valor teórico para el equivalente mecánico del calor es igual a 3.600 kJ/KWh. Por tanto, si la eficiencia global del sistema es del 20 por 100, la tasa de calor sería igual a 18.000 kJ/KWh

[(3.600 kJ/KWh)/0,20]. Los valores típicos de la tasa de calor para plantas térmicas se presentan en la Tabla 12. Con fines comparativos, los valores para los sistemas de recuperación de energía de residuos sólidos varían de 15.800 a 33.00 kJ/KWh.

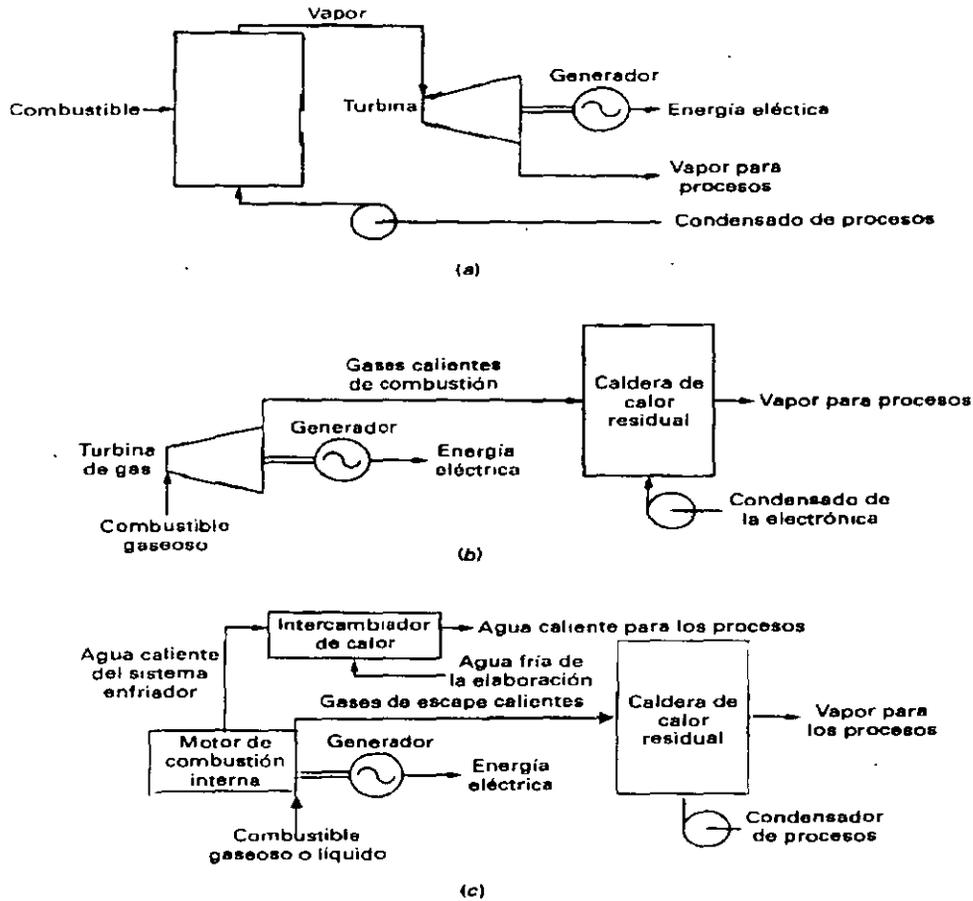


FIG. 28. DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA COGENERACIÓN DE ELECTRICIDAD, VAPOR Y/O AGUA CALIENTE; (a) UTILIZANDO UNA TURBINA DE VAPOR CON CALDERA CONTRAPRESIÓN, (b) UTILIZANDO UNA TURBINA DE GAS CON CALDERA DE CALOR RESIDUAL Y (c) UTILIZANDO UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON CALDERA DE CALOR RESIDUAL

Factores de eficiencia

Para valorar la eficiencia de la conversión en los diagramas de flujo dados en la Figura 27, se deben conocer los datos de eficiencia para los componentes individuales. En la Tabla 13 de esta sección se presentan y explican los datos representativos para calderas, gasificadores, turbinas de gas, combinados turbina de gas-generator, generadores eléctricos y para los usos de planta y los factores de pérdida relacionados.

TABLA 12
RENDIMIENTOS DE CALOR TÍPICOS PARA CENTROS TÉRMICOS REPRESENTATIVOS

Tipo de planta	Rendimiento de calor de planta Kcal/KWh	Eficacia térmica de la planta
Todas las plantas de vapor estacionarias, media	6.300	0,14
Plantas térmicas de vapor, media	2.898	0,30
Mejor planta térmica grande de vapor	2.142	0,40
Planta industrial pequeña de vapor no condensadora	8.820	0,10
Planta industrial pequeña de vapor condensadora	5.040	0,17
Planta térmica de vapor <<subproducto>>	1.0134-1.260	0,70-0,75
Planta de diesel	2.898	0,30
Planta térmica de gas natural	3.528	0,24
Planta térmica de gasolina	4.032	0,21
Planta térmica de gas de bajo poder calorífico	0.536	0,19

Calderas. Se pueden construir calderas como una parte integral del sistema de procesamiento térmico, como en una cámara de combustión con pantalla de agua, o como un dispositivo separado, como puede ser una caldera, de calor residual. Es importante poder estimar la eficiencia de una caldera ya que normalmente es el primer componente de un sistema para la recuperación de energía. Las variables más importantes que afectan a la eficiencia de las calderas incluyen: el contenido energético de los residuos sólidos, el contenido en humedad, la temperatura de salida de los gases de combustión y el diseño físico de los tubos de agua en la caldera. Aunque estas variables son específicas del diseño de cada caldera, pueden utilizarse los datos presentados en la Figura 29 y en la Tabla 13 como guía para estimar la eficiencia. Las curvas presentadas en la Figura 29 se basan en los residuos sólidos celulósicos (por ejemplo, papel y cartón) con un 50 por 100 de aire en exceso utilizado en el proceso de combustión. Las eficiencias constatadas para calderas se supone que incluyen pérdidas de calor latente y radiación, calor sensible y pérdidas de carbono no quemado. Comparadas con calderas que queman combustibles convencionales, donde son frecuentes eficiencias de hasta el 85 por 100, las calderas de residuos sólidos normalmente están en el rango de eficiencia del 60 al 70 por 100. Esta menor eficiencia se debe

principalmente al alto contenido en humedad de los residuos sólidos comparándolo con los combustibles sólidos convencionales, tales como carbón y madera.

Gasificadores. En la Tabla 13 se presentan datos sobre la eficiencia térmica de los gasificadores. El gas crudo y caliente es apto para alimentar calderas, mientras que el gas limpio y frío es requerido para alimentar turbinas de gas o motores recíprocos. En el ejemplo 4 se muestran los cálculos del balance de energía para un sistema con motor gasificador.

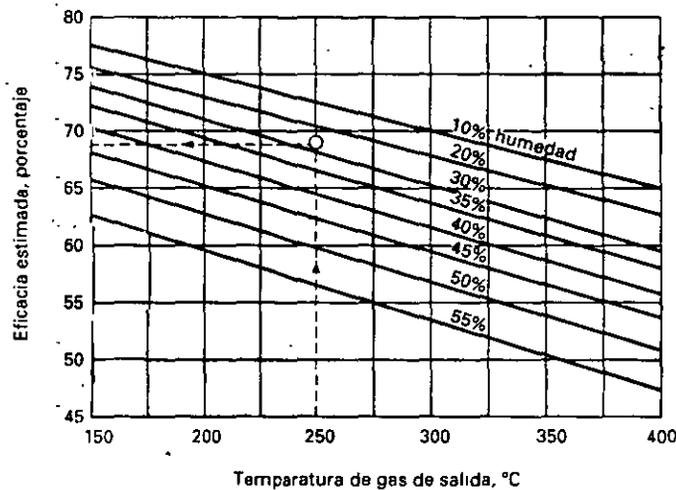


FIG. 29 EFICIENCIA ESTIMADA DE UNA CALDERA FRENTE A LA TEMPERATURA DEL GAS DE SALIDA PARA LA INCINERACIÓN DE RSU.

Ejemplo 4. Cálculo de la eficiencia y del rendimiento energético para un sistema de recuperación de energía utilizando una planta gasificador-motor-generador. Estimar la cantidad de energía producida a partir de un sistema de conversión energética de residuos sólidos con una capacidad de 50 t/d. El sistema consiste en una combinación de gasificador con lecho fluidizado-motor de combustión interna-generador eléctrico. Estimar también la tasa de calor y la eficiencia global del proceso.

TABLA 13
FACTORES TÍPICOS DE EFICIENCIA Y PÉRDIDA PARA SISTEMAS DE PROCESAMIENTO TÉRMICO

Componente	Eficiencia		Observaciones
	Rango	Típico	
Incineradora – caldera	40-68	63	Incineración en bruto.
Caldera			
Combustible sólido	65-72	70	Incineración en bruto.
Combustible sólido	60-75	72	RSU procesados.
Gas de bajo poder calorífico	60-80	75	Hay que modificar los quemadores
Alimentada por aceite	65-85	80	Los aceites producidos a partir de RSU quizás tendrán que mezclarse para reducir la corrosividad.
Reactor de pirólisis			
Convencional	65-75	70	
Purox	70-80	75	
Gasificadores			
Gas caliente	70-80	75	Incluye el calor sensible del gas, cuando se utiliza el gas en una caldera.
Gas frío, filtrado	60-70	65	No incluye el calor sensible del gas, cuando se utiliza el gas en un motor o turbina de gas.
Proceso de metanización	80-90	85	Conversión del gas de bajo poder calorífico en calidad de gas natural
Turbinas			
Gas de combustión			
Ciclo sencillo	8-12	10	
Regenerativo	20-26	24	Incluye los accesorios necesarios
Gas de expansión	30-50	40	
Generador-turbina de vapor			
Menor que 12,5 MW	24-30	29	Incluye condensador, calentadores y todos los otros accesorios necesarios, pro no incluye caldera.
Mayor que 25 MW	28-32	31,6	
Generador eléctrico			
Menor que 10 MW	88-92	90	
Mayor que 10 MW	94-98	96	
Factores de utilización y pérdida en planta			
Concesiones de servicio de la central			
Generador-turbina de vapor	4-8	6	
Proceso Purox	18-24	21	
Proceso de metanización	18-22	20	
Pérdidas de calor inexplicadas	2-8	5	

Solución

1. Construir una tabla de cálculos para determinar el rendimiento energético, utilizando los datos de la Tabla 13 (ver la Tabla siguiente)

Item	Valor
Energía bruta disponible en RSU, 10 ⁶ Kcal/h (50 t/d) (1.000 kg/t) (28.116 Kcal/kg) (1/24 d/h)	5,86
Energía química disponible del gasificador, gas frío limpio, 10 ⁶ Kcal/h 5,86 · 10 ⁶ Kcal/h · 0,7	4,10
Energía mecánica disponible del motor, 10 ⁶ Kcal/h 4,10 · 10 ⁶ Kcal/h · 0,25	1,025
Generación neta de energía eléctrica KW (1,025 · 10 ⁶ Kcal/h) · (0,90) / 860 Kcal/KWh	1.072

2. Determinar la tasa de calor para la planta propuesta utilizando la Ecuación correspondiente.

$$\text{Tasa de calor} = \frac{5.317.200 \text{ Kcal/h}}{976 \text{ KW}}$$

$$\text{Tasa de calor} = 5.448 \text{ Kcal/KWh}$$

3. Determinar la eficiencia global.

$$\text{Eficiencia} = \frac{(1.072 \text{ KW}) (860 \text{ Kcal/KWH})}{5,86 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h}}$$

$$\text{Eficiencia} = 15,7 \text{ por } 100$$

Comentario. Comparar la tasa de calor y la eficiencia de este sistema gasificador a pequeña escala (50 t/d) con el sistema a gran escala, con turbina de vapor (1.000 t/d, del Ejemplo 5. Aunque los valores son menores para el sistema gasificador, un sistema con turbina de vapor no sería rentable a esta escala. Se podría mejorar la eficiencia global utilizando un generador de energía más eficiente, tal como una turbina de gas de expansión (ver Tabla 13).

Turbina de gas. En la Tabla 13 se dan datos sobre la eficiencia térmica de diversas turbinas de gas. Los valores de eficiencia incluyen una concesión para los accesorios necesarios.

Sistemas de turbina de gas-generador. Los datos presentados en la Tabla 13 para el turbogenerador de vapor son consistentes con la práctica moderna y refleja todas las concesiones necesarias para condensadores, calefactores y otros accesorios. Utilizando el factor de eficiencia constatado del 31,6 por 100, el factor calorífico sería 10.800 Btu/KWh. Si se lograra una eficiencia de caldera del 75 por 100 la tasa de calor global sería 14.400 Btu/KWh. Esto es comparable con los valores presentados en la Tabla 12 para centrales térmicas de vapor.

Ejemplos. En la Tabla 14 se resumen los datos de dos incineradoras de RSU que utilizan actualmente turbinas de vapor-generadores. El sistema de Stanislaus County, California, es un sistema de combustión en bruto que emplea el sistema Martin de parrillas inversas-recíprocas. El sistema de Biddeford, Maine, es un sistema semifluidizado alimentado por CDR empleando calderas Babcock y Wilcox (ver Figura 30). Aunque los sistemas representan dos filosofías de diseño distintas, combustión en bruto frente a alimentación por CDR, las dos instalaciones tienen éxito en el cumplimiento de las normas de rendimiento y de los requisitos sobre emisiones de sus respectivas localidades.

Otros factores de uso y pérdida. En cualquier instalación en la que se produce energía, se deben hacer concesiones a las necesidades de la central o del proceso y a las pérdidas incontroladas del calor de proceso. Normalmente, la concesión de energía auxiliar varía del 4 al 8 por 100. Deben tenerse en cuenta ambos valores en la estimación de la tasa de calor neta cuando se utiliza la Ecuación correspondiente (última). En el ejemplo 5 se dan los cálculos de eficiencia para una turbina de vapor-generador típica.

Ejemplo 5. Cálculo del rendimiento energético y eficiencia para un sistema de recuperación de energía utilizando una planta de turbina de vapor-turbina-generator. Estimar la cantidad de energía producida por un sistema de conversión de energía de residuos sólidos con una capacidad de 1.000 t/d. El sistema consiste en una combinación de incineradora de RSU-caldera-turbina de vapor-generator eléctrico. Estimar también la tasa de calor y la eficiencia global del proceso, suponiendo que el consumo de servicio de la estación y las pérdidas de calor son del 6 y 5 por 100, respectivamente, de la energía total producida.

**TABLA 14
COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS DE INCINERACIÓN DE QUEMADO EN BRUTO
Y ALIMENTADO POR CDR**

Quemado en bruto-Condado de Stanislaus, California	
Capacidad	800 t/d
Parrilla	Martin inclinada, reciproca-reversible
Presión de vapor y temperatura	5.964 KN/m ² 443°C
Salida energética neta	20 MW (eléctrica)
Controles de contaminación atmosférica	NO _x : Exxon Thermal DeNO _x TM Systema Gases ácidos: depuración seca de gas de chimenea Partículas: filtro de bolsas
Proprietario/Operador	Ogden Martin Systemas, Inc.
Año de comienzo	1989
Alimentado por CDR – Biddeford, Maine	
Capacidad	600 t/d
Caldera	Babcock & Wilcox Waterwall
Salida energética neta	20 MW (eléctrica)
Controles de contaminación atmosférica	NO _x : no requerido Gases ácidos: depuración seca de gas de chimenea Partículas: filtro de bolsas
Proprietario/Operador	Maine Energy Recovery Company
Año de comienzo	1987

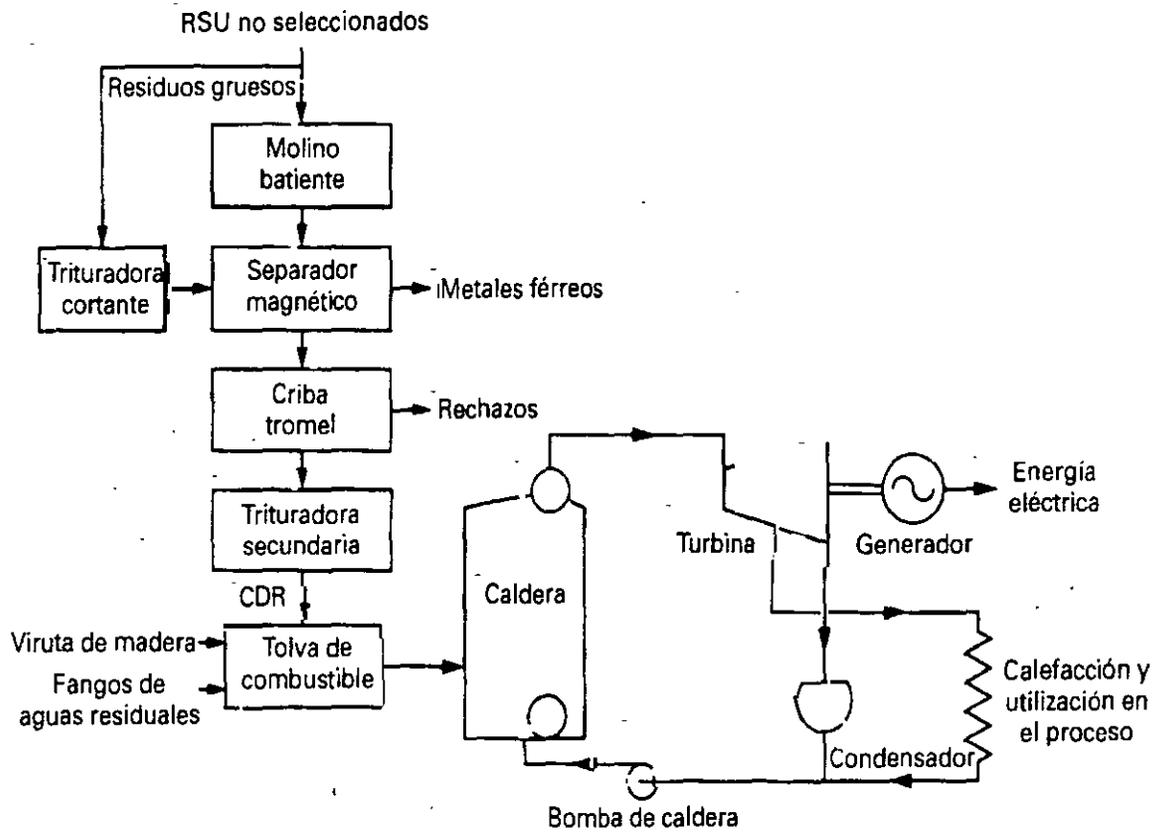


FIG. 30. DIAGRAMA DE FLUJO ESQUEMÁTICO PARA LA INCINERADORA DE CDR EN BIDDEFORD, MAINE.

Solución

1. Construir una tabla de cálculos para determinar el rendimiento energético, utilizando los datos de la Tabla 13.
2. Determinar la tasa de calor para la planta propuesta, utilizando la Ecuación correspondiente. (ver la Tabla siguiente)

$$\text{Tasa de calor} = \frac{117 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h}}{24.664 \text{ KW}}$$

$$\text{Tasa de calor} = 4.743 \text{ kcal/KWh}$$

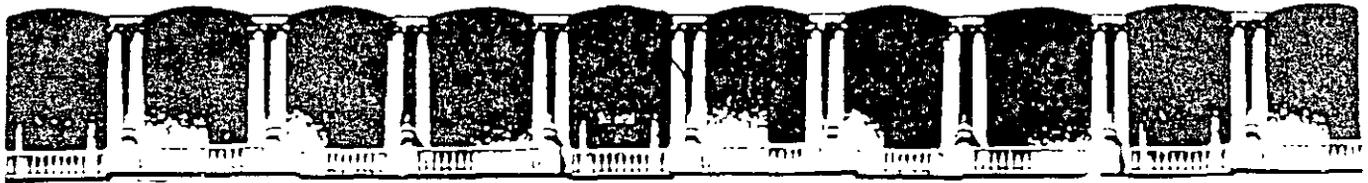
Item	Valor
Energía bruta disponible en RSU, 10 ⁶ Kcal/h [(1.000 kg/t) (1.000 kg/t) (2 816 Kcal/kg)] (24 h/d)	117
Energía de vapor disponible de la caldera 10 ⁶ Kcal/h (117 · 10 ⁶ Kcal/h) (0,7)	81,9
Energía mecánica disponible de la turbina de vapor, 10 ⁶ Kcal/h (81,9 · 10 ⁶ Kcal/h) (0,3)	24,6
Generación bruta de energía eléctrica KW (24,6 · 10 ⁶ Kcal/h) · (0,96) / (860 Kcal/KWh)	27.461
Consumo de servicio de la estación, KW (27 461) (0,06)	- 1.648
Pérdidas de calor, KW (27.461) (0,05)	- 1.373
Energía eléctrica neta disponible para su venta, KW	24.664

3. Determinar la eficiencia global.

$$\text{Eficiencia} = \frac{(24.664 \text{ KW}) (860 \text{ Kcal/KWh})}{(117 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h})}$$

$$\text{Eficiencia} = 18,12 \text{ por } 100$$

Comentario. Si se supone que el 10 por 100 de la energía generada se utiliza para el sistema de procesamiento primario (valores típicos que varían desde el 8 al 14 por 100), entonces la energía neta para su exportación sería 20.052 KW y la eficiencia global sería del 16 por 100.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS INSTITUCIONALES

**SECRETARIA DE OBRAS Y SERVICIOS URBANOS
GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL**

**INCINERACIÓN Y CREMACIÓN DE RESIDUOS.
Del 21 al 25 de Agosto del 2000.**

APUNTES GENERALES

Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez
Gobierno del Distrito Federal
Agosto/ 2000

INCINERACIÓN Y CREMACIÓN DE RESIDUOS

Del 21 al 25 de Agosto

1. PRINCIPIOS DE INCINERACIÓN
2. EL PROCESAMIENTO TÉRMICO
3. SISTEMAS DE INCINERACIÓN
4. SISTEMAS DE PIRÓLISIS
5. SISTEMAS DE GASIFICACIÓN
6. SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL
7. SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez

INCINERACIÓN Y CREMACIÓN DE RESIDUOS

El procesamiento térmico de los residuos sólidos, utilizado para la reducción en volumen y la recuperación de energía, es un elemento importante en muchos sistemas de gestión integral de residuos sólidos.

Comprender la función del procesamiento térmico dentro de un sistema de gestión integral de residuos sólidos es esencial para elegir el equipo y establecer normas de rendimiento. Por tanto, el enfoque de este trabajo se centra en los fundamentos de análisis del sistema y no sobre los detalles de diseño. El trabajo se organiza en las siguientes secciones:

- Principios de la incineración
- El procesamiento térmico
- Sistemas de incineración
- Sistemas de pirólisis
- Sistemas de gasificación
- Sistemas de control ambiental
- Sistemas de recuperación de energía

1. PRINCIPIOS DE INCINERACIÓN

Descripción de procesos de incineración

Las operaciones básicas implicadas en la incineración de RSM (Residuos Sólidos Municipales) no seleccionados se ven en la Figura 1. La operación comienza con la descarga de residuos sólidos desde vehículos de recolección (1) en un foso de almacenamiento (2). El ancho de la plataforma de descarga y del foso de almacenamiento está en función del tamaño de la instalación y del número de camiones que deben descargarse simultáneamente. La profundidad y ancho del foso de almacenamiento se determinan por la tasa de recepción de carga de

residuos y la de incineración. La capacidad del foso de almacenamiento es normalmente equivalente al volumen de residuos por lotes en el conducto de alimentación (de carga) (4), que dirige los residuos al horno (5). El operador de la grúa puede seleccionar la mezcla de residuos para conseguir un contenido de humedad más o menos homogéneo en la alimentación. También se separan de los residuos los artículos grandes y no combustibles con la grúa puente. Los residuos sólidos en el conducto de alimentación (de carga) caen en las parrillas (6), donde son quemados en bruto. Normalmente se utilizan varios tipos distintos de alimentadores mecánicos.

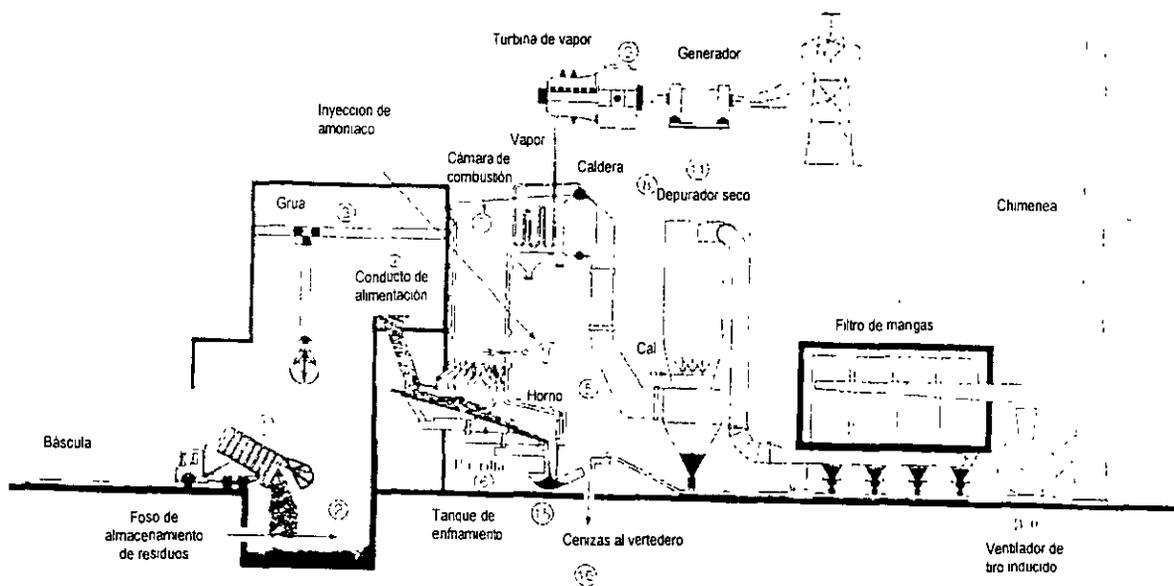


FIG. 1. SECCIÓN DE UNA INCINERADORA MUNICIPAL DE ALIMENTACIÓN CONTINUA Y DE QUEMADO EN BRUTO TÍPICA UTILIZADA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RSM.

Se puede introducir aire desde el fondo de las parrillas (aire primario) mediante un ventilador de aire forzado o desde la parte superior de las parrillas (aire secundario), para controlar la velocidad de incineración y la temperatura del horno. Como la mayoría de los residuos orgánicos son térmicamente inestables, se emiten varios gases desde el horno durante el proceso de combustión. Estos gases y pequeñas partículas orgánicas suben a la cámara de combustión (7), y se queman a temperaturas superiores a 870°C (1.600°F). Se recupera el calor de los gases calientes utilizando tubos llenos de agua en las paredes de la cámara de combustión y con una caldera (8) que produce vapor, que se convierte en electricidad mediante un generador de turbina (9).

El equipamiento de control de contaminación del aire puede incluir la inyección de amoníaco para controlar NO_x (óxidos de nitrógeno) (10), una depuradora seca para controlar SO₂ y los gases ácidos (11), y un filtro de bolsas para separar partículas (12). Para asegurar flujos de aire adecuados que compensen las pérdidas en el tiro causadas por el equipamiento de control de contaminación del aire, así como para suministrar aire a la misma incineradora, puede ser necesario un ventilador de tiro inducido (13). Los productos finales de incineración son gases calientes de combustión y cenizas. Los gases limpios se conducen a la chimenea (14) para su dispersión atmosférica. Las cenizas y rechazos no quemados caen desde las parrillas en una tolva de rechazos (15) localizada debajo de las parrillas, donde son tratados con agua. Las cenizas volantes procedentes del filtro de bolsas y de la depuradora seca se mezclan con las cenizas del horno y se transportan a instalaciones para tratamiento de cenizas (16).

Productos de incineración

Los elementos principales de los residuos sólidos son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. También se encontrarán pequeñas cantidades de otros elementos en la ceniza. Bajo condiciones ideales, los productos gaseosos derivados de la incineración de RSM con cantidades estequiométricas de aire incluirían dióxido de carbono (CO₂) agua (H₂O), nitrógeno (N₂) y pequeñas

cantidades de dióxido de azufre (SO₂). En realidad son posibles muchas secuencias de reacción, según la naturaleza exacta de los residuos y las características operacionales del reactor de combustión. Las reacciones básicas para la oxidación (combustión) de carbono, hidrógeno y azufre (y sus masas atómicas) contenidas en la fracción orgánica de los RSM son las siguientes:

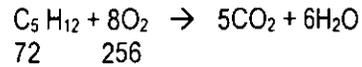


Si se considera que el aire seco contiene un 23.15 por 100 de oxígeno en peso, entonces la cantidad de aire necesario para la oxidación de 453 g de carbono sería igual a 5.222 kg $[(32/12) (1/0.2315)]$. Las cantidades correspondientes para hidrógeno y azufre son 15.655 kg y 1.955 kg, respectivamente. El cálculo de la cantidad de aire necesaria para la incineración completa de residuos orgánicos se ilustra en el Ejemplo 1.

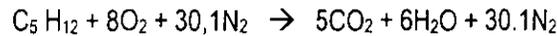
Ejemplo 1. Determinación de la cantidad estequiométrica de aire necesaria para la combustión de residuos sólidos orgánicos. Determinar la cantidad (kg y m³) de aire necesario para la incineración completa de una tonelada de residuos sólidos orgánicos. Suponer que la composición de los residuos orgánicos que se van a incinerar es C₅H₁₂. Suponer que el peso específico del aire es 1.2 kg/m³.

Solución

1. Escribir una ecuación estequiométrica equilibrada para la oxidación del compuesto orgánico basándose en el oxígeno:



2. Escribir una ecuación equilibrada para la oxidación del compuesto orgánico con el aire. En los cálculos de combustión, el aire seco se supone que está compuesto del 21 por 100 oxígeno y 79 por 100 nitrógeno. Por lo tanto, la reacción correspondiente a aquella dada en el paso 1 para el aire es:



3. Determinar la cantidad de aire necesario para la incineración, suponiendo que el aire contiene el 23 por 100 de oxígeno en peso.

$$\text{O}_2 \text{ necesario} = \frac{256}{72} \cdot (1.000 \text{ kg/t}) = 3,556 \text{ kg/t}$$

$$\text{Aire necesario} = \frac{3,556 \text{ kg/t}}{0,2315} = 15,361 \text{ kg/t}$$

4. La cantidad de aire necesario para la combustión también puede calcularse utilizando los factores anteriormente dados.

$$\text{Aire necesario para el carbono, C} = \frac{60}{72} \cdot (1.000 \text{ kg/t}) \cdot 11,52 = 9,600 \text{ kg/t}$$

$$\text{Aire necesario para el hidrógeno, H} = \frac{12}{72} \cdot (1.000 \text{ kg/t}) \cdot 34,56 = 5,760 \text{ kg/t}$$

$$\text{Total del aire necesario} = 9,600 + 5,760 = 15,360 \text{ kg/t}$$

5. Determinar el volumen del aire necesario para la incineración.

$$\text{Volumen de aire} = (15,361 \text{ kg/t}) / (1,2 \text{ kg/m}^3) = 12,801 \text{ m}^3/\text{t}$$

Comentario. En el paso 2, el nitrógeno se mantiene en los dos lados de la ecuación porque no entra en la reacción. Aunque en este ejemplo se suponía la incineración completa con fines de ilustrar los cálculos implicados en cálculos estequiométricos, casi nunca se consigue la incineración completa en la práctica. Normalmente, del 3 al 5 por 100 de la materia orgánica en la alimentación de entrada se encontraría en las cenizas procedentes de una incineradora.

Tipos de incineradora

Las incineradoras de residuos sólidos se pueden diseñar para operar con dos tipos de residuos sólidos como combustible: RSM en bruto o en masa no seleccionados (incineración en masa) y RSM procesados, conocidos como combustible derivado de residuos (CDR). Las incineradoras en masa son el tipo predominante. En 1987, el 68 por 100 de la capacidad operacional de las incineradoras en Estados Unidos fue proporcionado con unidades de incineración en masa y el 23 por 100 con unidades de quemado CDR. El 9 por 100 restante de la capacidad fue proporcionado con unidades de incineración modular de incineración en masa.

Incineradoras de combustión en masa. En una incineradora de combustión en masa (ver figura 2), se da un procesamiento mínimo a los residuos sólidos antes de colocarlos en la tolva de alimentación de la incineradora. El operador de la grúa encargado de cargar la alimentadora puede rechazar artículos claramente no aptos. Sin embargo, se debe suponer que cualquier objeto dentro del flujo de RSM puede entrar finalmente en la incineradora, incluyendo objetos voluminosos no combustibles (por ejemplo, triciclos rotos, etc.), incluso residuos potencialmente peligrosos entregados en el sistema, bien a propósito o descuidadamente. Por estas razones, la incineradora se debe diseñar para manipular estos residuos rechazables sin causar daños al equipamiento o personal. El contenido energético de los residuos quemados en bruto puede ser extremadamente variable, según el clima, la estación del año y el origen de los residuos. A pesar de estas desventajas potenciales, las incineradoras de combustión en masa han llegado a ser la tecnología elegida para la mayoría de las incineradoras existentes y planeadas.

Incineradoras alimentadas por CDR. Comparándolo con la naturaleza incontrolada de los RSM no seleccionados y no procesados, el CDR puede producirse a partir de la fracción orgánica de los RSM, con una consistencia bastante buena como para cumplir las especificaciones de contenido energético, humedad y contenido de cenizas. Se puede producir CDR en forma triturada o

fibrosa, o en formas cilíndricas o cúbicas densificadas. El CDR densificado (CDR) es más costoso de producir, pero es más fácil de transportar y almacenar. Se pueden quemar las dos formas solas o mezcladas con carbón.

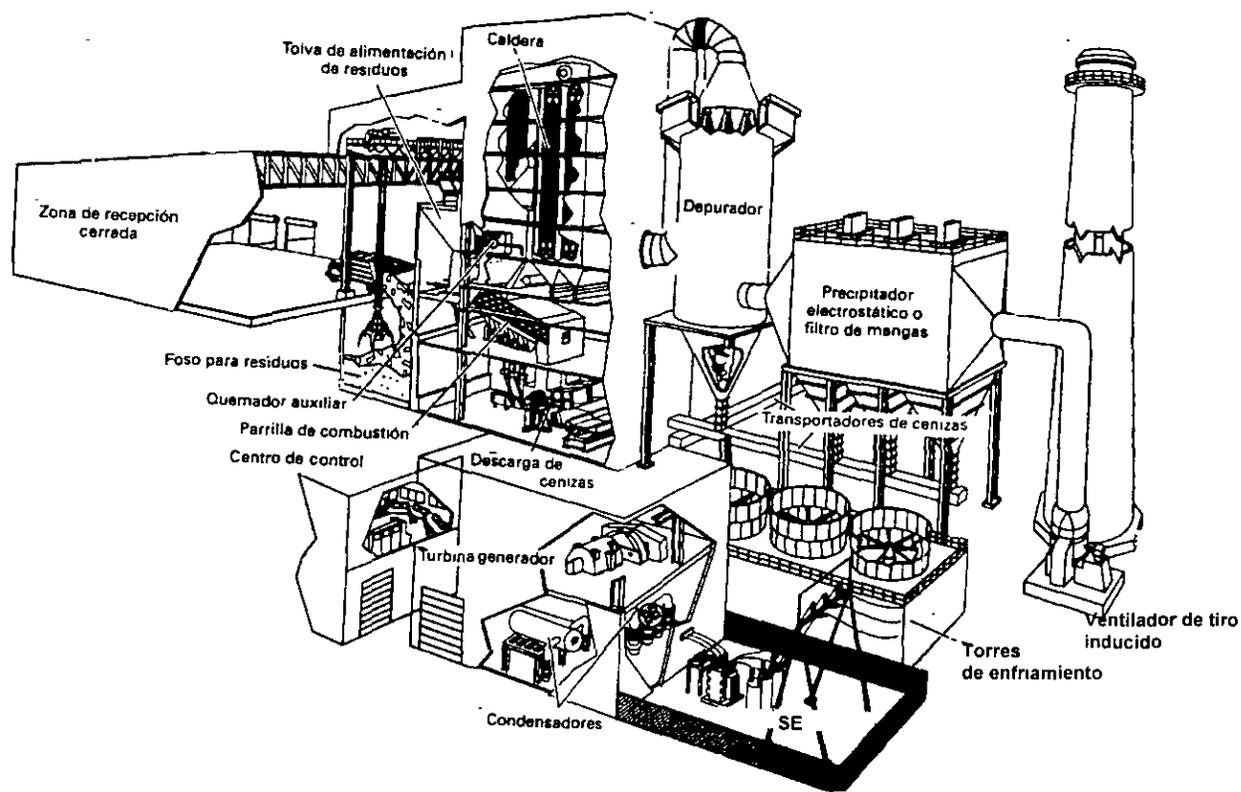


FIG. 2. SECCIÓN DE INCINERADORA ALIMENTADA POR RSM EN BRUTO, UTILIZADA PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RSM.

Por el contenido energético más alto del CDR comparándolo con los RSM no procesados, los sistemas de incineración de CDR (ver figura 3) pueden ser físicamente más pequeños que los sistemas comparablemente equivalentes de RSM quemados en bruto. Sin embargo, se necesitará más espacio si el sistema de procesamiento, necesario para preparar CDR, se va a localizar al lado de la incineradora. Un sistema alimentado por CDR, también se puede controlar más eficientemente que un sistema de incineración en masa, por la naturaleza más homogénea del CDR, que permite un mejor control de la combustión y un mejor rendimiento de los dispositivos de control de contaminación del aire. Adicionalmente, un sistema correctamente diseñado para el preprocesamiento de los RSM puede lograr la separación de porciones importantes de metales, plásticos y otros materiales que puedan contribuir a emisiones aéreas nocivas.

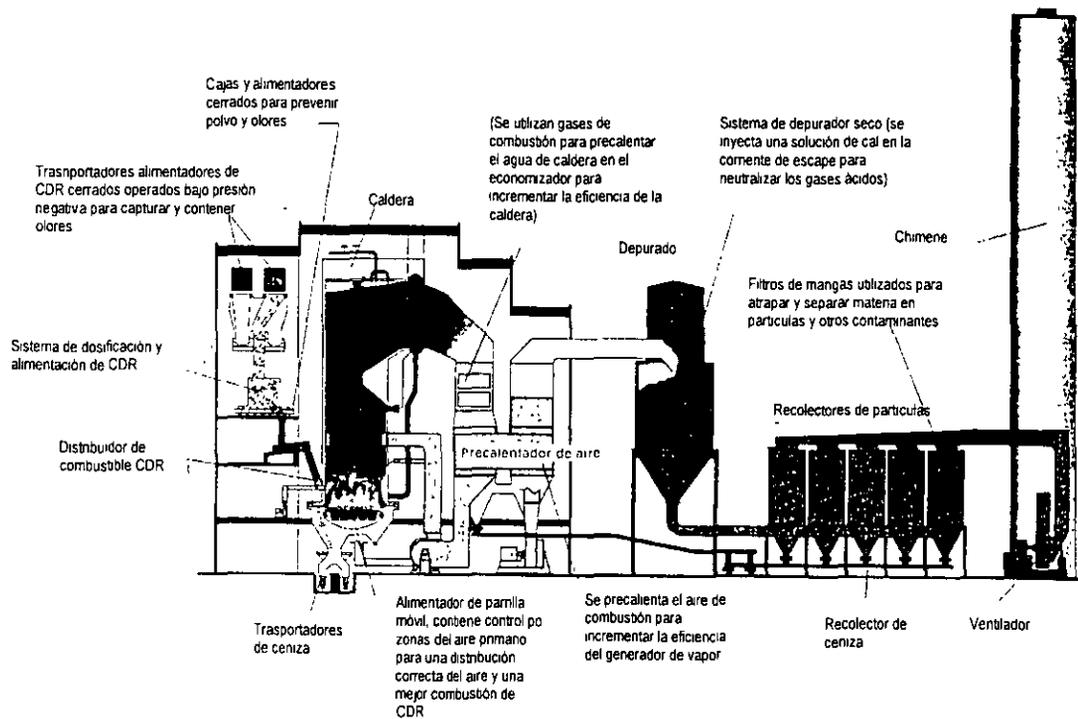


FIG. 3. VISTA DE UN SISTEMA DE INCINERACIÓN CON CALDERA UTILIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS PROCESADOS, GAS NATURAL, ACEITE Y CARBÓN

Recuperación de energía

Virtualmente todas las nuevas incineradoras actualmente en construcción en Estados Unidos y Europa emplean alguna forma de recuperación de energía para ayudar a recuperar los costos de operación, y reducir los costos de financiamiento del equipamiento para controlar la contaminación del aire. La energía puede recuperarse de los gases calientes de chimenea generados por la incineración de RSM procesados, de combustible sólido en forma cilíndrica (por ejemplo, CDR), o de RSM no procesados, mediante dos métodos:

- Uso de una cámara de incineración de pantalla de agua
- El uso de calderas de calor procedente de residuos, o ambos.

Se puede generar agua caliente o vapor. El agua caliente puede utilizarse para aplicaciones industriales o para calefacción central de baja temperatura. El vapor es más versátil, porque se puede utilizar para calefacción y para generación de electricidad. Quizás el diagrama de flujo más común para la producción de energía eléctrica utilizando vapor implica el uso de una combinación generador-turbina de vapor, como se muestra en la Figura 4.

Reducción en volumen

Entre los factores que se deben considerar en la valoración de los procesos de incineración de RSM está la cantidad de rechazos que quedan después de la incineración y si se necesitará combustible auxiliar cuando la recuperación de calor no sea de importancia primaria.

La cantidad de rechazos depende de la naturaleza de los residuos incinerados. En la Tabla 1 se presentan datos representativos sobre los rechazos procedentes de varios componentes de residuos sólidos. Los cálculos necesarios para valorar la cantidad y la composición de los rechazos después de la incineración se ilustran en el ejemplo 2.

Vapor de residuos sólidos triturados o clasificados, o pelets de combustible quemado directamente en la caldera, o de residuos sólidos quemados en bruto en una caldera de pared de agua. En las unidades de incineración en bruto quizás sea necesario un combustible auxiliar.

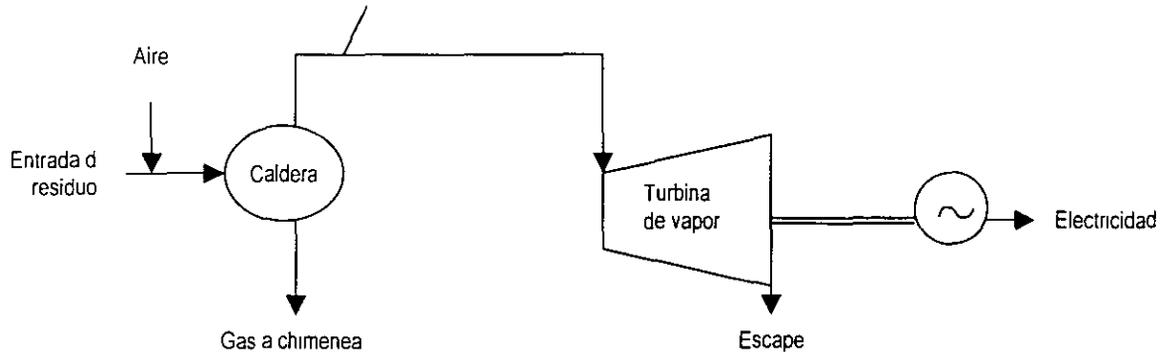


FIG. 4. ESQUEMA DE UN SISTEMA PARA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA UTILIZANDO UNA COMBINACIÓN GENERADOR-TURBINA DE VAPOR.

TABLA 1
COMPOSICIÓN DEL RECHAZO DE LA INCINERACIÓN DE RSM NO SELECCIONADOS

Componente	Porcentaje en peso	
	Rango	Típico
Materia orgánica parcialmente quemada o no quemada	3-10	5
Lata de hojalata	20-25	18
Otro hierro y acero	6-15	10
Otros metales	1-4	2
Vidrio	30-50	35
Cerámicas, piedras, ladrillos	2-8	5
Cenizas	10-35	25
TOTAL		100

Ejemplo 2. Determinación de la reducción en volumen y del volumen de los rechazos después de la incineración. Determinar la cantidad y la composición de los rechazos procedentes de una incineradora utilizada para residuos sólidos urbanos de composición media. Estimar la reducción en volumen de los residuos si se supone que el peso específico de los rechazos es de 593 kg/m^3 .

Solución

1. Construir una tabla de cálculos para determinar la cantidad de rechazos y su distribución porcentual por peso. A continuación se presenta la tabla de cálculos completada:

Componente	Residuos sólidos, kg	Rechazo inerte, porcentaje	Rechazo	
			kg	Porcentaje
Orgánico				
Residuos de comida	90	5	4.5	1.9
Papel	340	6	20.4	8.6
Cartón	60	5	3.0	1.3
Plásticos	70	10	7.0	2.9
Textiles	20	6.5	1.3	0.5
Goma	5	9.9	0.5	0.2
Cuero	5	9.0	0.5	0.2
Residuos de jardín	185	4.5	8.3	3.5
Madera	20	1.5	0.3	0.1
Orgánicos misceláneos	---	---	---	---
Inorgánico				
Vidrio	80	98	78.4	33.0
Latas de hojalata	60	98	58.8	24.7
Aluminio	5	96	4.8	2.0
Otros metales	30	98	29.4	12.4
Suciedad, cenizas, etc.	30	68	20.4	8.6
TOTAL	1.000		237.6	100

2. Estimar los volúmenes originales y finales antes y después de la incineración. Para estimar el volumen inicial estimado suponer que el peso específico medio de los residuos sólidos en el pozo de almacenamiento de la incineradora es aproximadamente 222 kg/m^3 .

$$\text{Volumen original} = \frac{1,000 \text{ kg}}{222 \text{ kg/m}^3} = 5 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de rechazos} = \frac{237.5 \text{ kg}}{593 \text{ kg/m}^3} = 0.4 \text{ m}^3$$

3. Estimar la reducción en volumen utilizando la ecuación (4.1).

$$\text{Reducción en volumen} = \frac{5 - 0.4}{5} \cdot 100 = 92 \text{ por } 100$$

Cuestiones sobre las plantas de incineración

Las principales cuestiones asociadas con el uso de incineradoras para la transformación de RSM están relacionadas con:

- La localización
- Las emisiones a la atmósfera
- La evacuación de rechazos
- Las emisiones líquidas
- La economía

Si no se resuelven las preguntas relacionadas con estas cuestiones importantes, el uso de la incineración puede tener un futuro incierto. A continuación se presentan estos temas y se examinan en detalle posteriormente.

Localización. Como en la localización de IRM, ha sido posible construir y operar plantas de incineración próximas a zonas residenciales e industriales; sin embargo, hay que tener cuidado en su operación, determinando si van a ser ambiental y estéticamente aceptables. Idealmente para minimizar el impacto de la operación de plantas de incineración, éstas deberían localizarse en zonas más aisladas, donde se puedan mantener zonas adecuadas de seguridad alrededor de la instalación. En muchas comunidades, las incineradoras están localizadas en lugares remotos, dentro de los límites de la ciudad o en la zona de vertedero.

Emisiones a la atmósfera. La operación de plantas de incineración provoca la producción de diversas emisiones gaseosas y partículas, muchas de las cuales se piensa que pueden tener graves impactos sobre la salud. La capacidad demostrada de las instalaciones y del equipamiento de la planta de incineración para controlar eficazmente las emisiones gaseosas y en partículas es de una importancia fundamental en la localización de estas instalaciones. El diseño correcto de sistemas para el control de estas emisiones es una parte crítica del diseño de sistemas de incineración. En algunos casos, el costo y la complejidad

de los sistemas de control ambiental son iguales o incluso mayores que el costo de la planta de incineración.

Evacuación de rechazos. Las plantas de incineración producen varios rechazos sólidos, incluyendo:

- Cenizas de fondo
- Cenizas volantes
- Productos de depuración

La gestión de estos residuos sólidos es una parte integral del diseño y la operación de una planta de incineración. Normalmente la ceniza de fondo se evacua mediante descarga. La principal preocupación con el vertido de cenizas es que puede, bajo ciertas condiciones, lixiviar contaminantes en el agua subterránea. En consecuencia, actualmente se evacuan las cenizas procedentes de incineradoras en vertederos de RSM o en monovertederos doblemente recubiertos destinados únicamente a la evacuación de cenizas.

Emisiones líquidas. Las emisiones líquidas procedentes de las plantas de incineración pueden surgir de una o más de las siguientes fuentes:

- Aguas residuales de instalaciones para separación de cenizas
- Efluente procedente de depuración por vía húmeda
- Aguas residuales de sellado de bombas, de limpieza y de actividades de mantenimiento en general
- Aguas residuales procedentes de los sistemas de tratamiento utilizados para producir agua de caldera de alta calidad
- Purgas de torres de enfriamiento.

La manipulación y evacuación correctas de estas emisiones líquidas también es una parte importante en el diseño de las plantas de incineración.

Economía. Las cuestiones económicas para un sistema de incineración propuesto deben evaluarse cuidadosamente, con el fin de permitir una elección entre sistemas alternativos. La mejor forma de comparar sistemas alternativos es mediante el cálculo del costo del ciclo de vida, que tiene en cuenta los costos de operación y mantenimiento durante la vida del sistema. La industria de residuos sólidos ha desarrollado un acercamiento estandarizado para calcular el costo del ciclo de vida mediante el uso de una declaración por forma de ingresos.

2. EL PROCESAMIENTO TÉRMICO

El procesamiento térmico de los residuos sólidos puede definirse como la conversión de los residuos sólidos en productos de conversión gaseosos, líquidos y sólidos, con la simultánea o subsiguiente emisión de energía en forma de calor. Los sistemas de procesamiento térmico pueden clasificarse en base a sus requisitos de oxígeno (ver Figura 5). La combustión con la cantidad de oxígeno exactamente necesaria para la combustión total se conoce como combustión estequiométrica. La combustión con oxígeno en exceso sobre las necesidades estequiométricas se denomina combustión con exceso de aire. La gasificación es la combustión parcial de los residuos sólidos bajo condiciones subestequiométricas para generar un gas combustible que contiene monóxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos gaseosos. La pirólisis es el procesamiento térmico de residuos en ausencia completa de oxígeno. En las secciones siguientes se argumentan más detalladamente la gasificación y la pirólisis.

Combustión estequiométrica

Las reacciones básicas para la combustión estequiométrica del carbono, hidrógeno, y azufre en la fracción orgánica de los RSM son las siguientes:



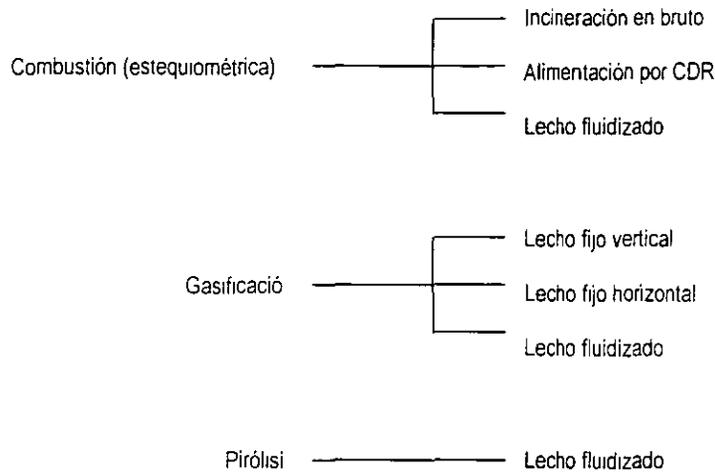


FIG. 5. SISTEMAS REPRESENTATIVOS DEL PROCESAMIENTO TÉRMICO



Si se considera que el aire seco contiene un 23.15 por 100 de oxígeno por peso, entonces la cantidad de aire requerida para la oxidación de 1 kg de carbono sería igual a 11.52 kg $[(32/12) (1/0.2315)]$. Las cantidades correspondientes para hidrógeno y azufre son 34.56 y 4.31 kg, respectivamente. Hay que tener en cuenta que primero tiene que ser ajustada la cantidad de hidrógeno, mediante la sustracción de un octavo del porcentaje total de hidrógeno inicialmente presente en los residuos (esta sustracción tiene en cuenta el oxígeno de los residuos combinándose con el hidrógeno para formar agua).

Combustión con aire en exceso

Por la naturaleza heterogénea de los residuos sólidos, con cantidades estequiométricas de aire, en sistemas de incineración, en la práctica, se debe utilizar oxígeno adicional para aumentar la mezcla y las turbulencias, asegurando así que el aire pueda llegar a todas las partes de los residuos. El uso de aire en exceso en la incineración afecta a la temperatura y a la composición de los productos de combustión (conocidos como gases de chimenea). Mientras aumenta el porcentaje de aire en exceso, el contenido en oxígeno de los gases de chimenea también se incrementa y la temperatura de combustión disminuye; por lo tanto, el aire de la combustión puede usarse para controlar la temperatura de combustión. La temperatura de los gases de chimenea es importante desde el punto de vista de control de olores. Cuando las temperaturas de combustión son menores de 790°C, puede producirse la emisión de compuestos olorosos. También se ha comprobado que con temperaturas superiores a 980°C se minimiza la emisión de toxinas, furanos, compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros compuestos potencialmente peligrosos en los gases de chimenea.

Calor generado por la combustión

El calor emitido durante el proceso de combustión es parcialmente almacenado en los productos de combustión y parcialmente transferido por convección, conducción y radiación a las paredes del sistema de combustión, al combustible entrante y a los rechazos. Si se conoce la composición elemental de los residuos sólidos, se puede estimar el contenido energético utilizando la forma modificada de la ecuación de Dulong. A menudo, el contenido energético de los residuos sólidos se basa en un análisis del poder calorífico de los componentes individuales de los residuos. Los cálculos de combustión necesarios para estimar el calor disponible procedente del proceso de combustión, para su conversión en vapor y finalmente en energía eléctrica, son ilustrados en el Ejemplo 3.

Ejemplo 3. Balance de masas y de calor para la incineración de residuos sólidos. Determinar el calor disponible en los gases de salida procedentes de la incineración de 125 t/d de residuos sólidos con las siguientes características:

Componente	Porcentaje del total	Kg/d
Combustible	54.6	61.91
No combustible	24.0	27.1
Agua	21.4	24.26

Elemento	Porcentaje
Carbono	27.4
Hidrógeno	3.6
Oxígeno	23.0
Nitrógeno	0.5
Azufre	0.1
Agua	21.4
Inertes	24.0

Suponer que son aplicables las siguientes condiciones:

1. El valor calorífico de los residuos sólidos quemados es de 2,816 Kcal/kg.
2. El rechazo de la parrilla contiene un 5 por 100 de carbono no quemado.
3. Temperaturas:

Aire entrando, 27°C

Rechazos de parrilla, 427°C

4. Calor específico del rechazo = 0.249 Kcal/kg-°C.
5. Calor latente del agua = 578 kcal/kg.
6. Pérdida por radiación = 0.005 Kcal/Kcal del calor bruto de entrada.
7. Todo el oxígeno en los residuos está dentro del agua.
8. Requisitos teóricos de aire basándose en la estequiometría

Carbono: $(C + O_2 \rightarrow CO_2) = 11.52 \text{ kg/kg}$

Hidrógeno: $(2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O) = 34.56 \text{ kg/kg}$

Azufre: $(S + O_2 \rightarrow SO_2) = 4.31 \text{ kg/kg}$

9. El hidrógeno neto disponible para la incineración es igual al porcentaje de hidrógeno menos 1/8 del porcentaje de oxígeno. Esto explica el agua <<atrapada>> en el material combustible seco.
10. El poder calorífico del carbono es de 748 Kcal/kg.
11. La humedad en el aire de combustión es del 1 por 100.

Solución

1. Construir una tabla de cálculos para calcular los pesos de los elementos en los residuos sólidos.

	Elemento	Kg/d
Carbono	$= 0.274 \cdot 125,000 =$	34,250
Hidrógeno	$= 0.036 \cdot 125,000 =$	4,500
Oxígeno	$= 0.230 \cdot 125,000 =$	28,750
Nitrógeno	$= 0.005 \cdot 125,000 =$	620
Azufre	$= 0.001 \cdot 125,000 =$	120
Agua	$= 0.214 \cdot 125,000 =$	26,750
Inertes	$= 0.240 \cdot 125,000 =$	30,000
Total		125,000

2. Calcular la cantidad del rechazo:

$$\text{Inertes} = 30,000 \text{ kg/d}$$

$$\text{Total de rechazos} = 30,000/0.95 = 31,580 \text{ kg/d}$$

$$\text{Carbono en el rechazo} = 1,580 \text{ kg/d}$$

3. Determinar el hidrógeno y el agua atrapada disponible:

$$\text{Hidrógeno neto disponible, porcentaje} = (3.6 - 23/8) = 0.725 \text{ por } 100 = 906.25 \text{ kg/d}$$

$$\text{Hidrógeno en el agua combinada} = 3.6 - 0.725 = 2.875 \text{ por } 100 = 3,593.75 \text{ kg/d}$$

$$\text{Agua combinada} = \text{oxígeno} + \text{hidrógeno en el agua combinada} =$$

$$28,750 + 3,593.75 = 32,343.75 \text{ kg/d}$$

4. Construir una tabla de cálculos para calcular el aire requerido.

Elemento	Requisitos de aire, kg/d
Carbono = $(34,250 - 1,580) \cdot 11.52$	376,358
Hidrógeno = $906.25 \cdot 34.56$	31,284
Azufre = $120 \cdot 4.31$	517
Total de aire teórico seco	408,159
Total de aire seco incluyendo 100 por 100 adicional	816,312 ^a
Humedad = $816.312 \cdot 0,01$	8,163
Total de aire	824,475

^a Kg de aire/kg de residuos sólidos = $408,159 \text{ kg de aire} / 125,000 \text{ de residuos sólidos} = 3.27$.

5. Determinar la cantidad de agua producida a partir de la combustión del hidrógeno disponible:

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{2 \text{ kg H}_2} \cdot 906.25 \text{ kg H}_2/\text{d} = 8,156 \text{ Kg/d}$$

6. Preparar un balance de calor para el proceso de combustión.

Item	Valor, 10 ⁶ Kcal/d
Entrada de calor bruto = $125.000 \text{ kg/d} \cdot 2.816 \text{ Kcal/kg}$	352
Calor perdido en el carbono no quemado = $1,580 \cdot 7,770$	- 12.2
Pérdida de radiación = $0.005 \cdot 352$	- 1.7
Humedad inherente = $26,750 \cdot 578$	- 15.4
Humedad en el agua combinada = $32,344 \cdot 578$	- 18.7
Humedad a partir de la incineración del hidrógeno disponible = $8,156 \cdot 578$	- 4.7
Calor sensible en el rechazo = $31,580 \cdot 0.249 \cdot 400$	- 3.1
Total de pérdidas	55.8
Calor neto disponible en los gases de chimenea = $352 - 55.8 \cdot 10^6$	296.2
Eficiencia de la incineración = $296.2 \cdot 10^6 / 352 \cdot 10^6 \cdot 100 \text{ por } 100$	84.1 por 100

Comentario. Si la eficiencia de la caldera fuese de un 85 por 100, entonces la eficiencia global sería igual a la eficiencia de combustión multiplicada por la eficiencia de la caldera ($84.1 \text{ por } 100 \cdot 85 \text{ por } 100$), aproximadamente un 71.5 por 100. Este valor es compatible con los valores obtenidos en las incineradoras modernas de RSM.

3. SISTEMAS DE INCINERACIÓN

Incineración puede definirse como el procesamiento térmico de los residuos sólidos mediante oxidación química con cantidades estequiométricas o en exceso de oxígeno. Los productos finales incluyen gases calientes de combustión, compuestos principalmente de nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua (gas de chimenea), y rechazos no combustibles (ceniza). Se puede recuperar energía mediante el intercambio del calor procedente de los gases calientes de combustión.

Tipos de sistemas de incineración

Los sistemas de incineración de residuos sólidos pueden diseñarse para operar con dos tipos de combustible de residuos sólidos procesados en forma de combustible derivado de residuos (CDR quemado). El tipo predominante son los sistemas de incineración en bruto. En 1987, el 68 por 100 de la capacidad operacional de incineración en Estados Unidos fue proporcionado por unidades de combustión en bruto, frente al 23 por 100 alimentadas por CDR. El 9 por 100 restante de la capacidad se proporcionó con sistemas unitarios de incineración modular de combustión en bruto, tratados una sección más adelante.

Sistemas de incineración de combustión en bruto. En un sistema de incineración de quemado en bruto se da un procesamiento mínimo a los residuos antes de colocarlos en la tolva de alimentación del sistema (ver Figura 6). El operario de la grúa, responsable de cargar la tolva de alimentación, puede rechazar objetos claramente inservibles. Sin embargo, debe suponerse que cualquier cosa dentro del flujo de residuos sólidos pueden entrar finalmente en el sistema, incluyendo artículos voluminosos demasiado grandes y no combustibles (por ejemplo refrigeradores) e incluso residuos potencialmente peligrosos entregados al sistema a propósito o accidentalmente.

Por estas razones, el sistema debe diseñarse para manipular estos residuos incómodos sin causar daños al equipamiento o al personal operario. El contenido energético de los residuos quemados en bruto puede ser extremadamente variable, según el clima, la estación y el origen de los residuos. A pesar de estas desventajas potenciales, la incineración de quemado en bruto se ha convertido en la tecnología elegida por la mayoría de los sistemas existentes y en proyecto.

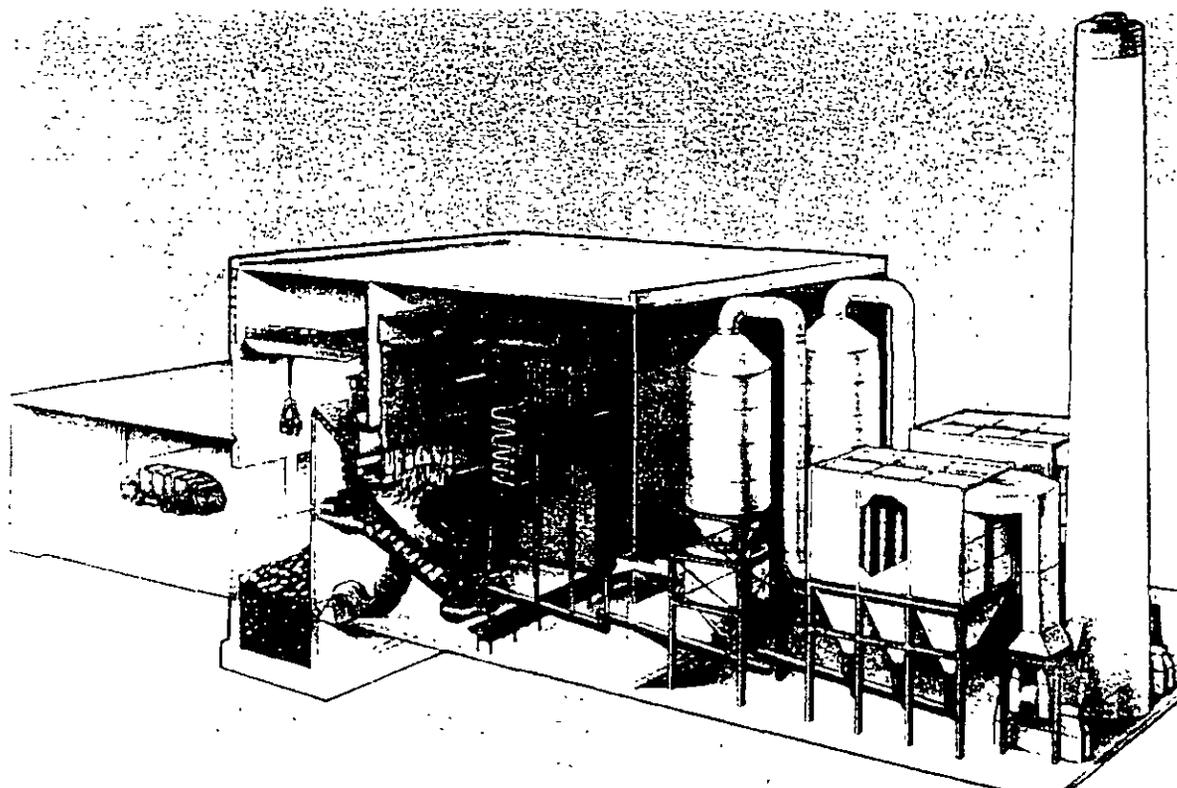


FIG. 6. SECCIÓN A TRAVÉS DE UNA INCINERADORA MODERNA DE QUEMADO EN BRUTO DE RSM

Uno de los componentes más cruciales de un sistema de incineración de quemado en bruto es el sistema de parrillas. Este sistema sirve para diversas funciones, incluyendo el movimiento de los residuos a través del sistema, la mezcla de los residuos y la inyección de aire para la combustión. Son muchas las variantes posibles de parrillas, en base a elementos de alternancia, oscilación y rotativos. En

la Figura 7 se muestran algunos sistemas de parrillas para incineradoras de combustión en bruto.

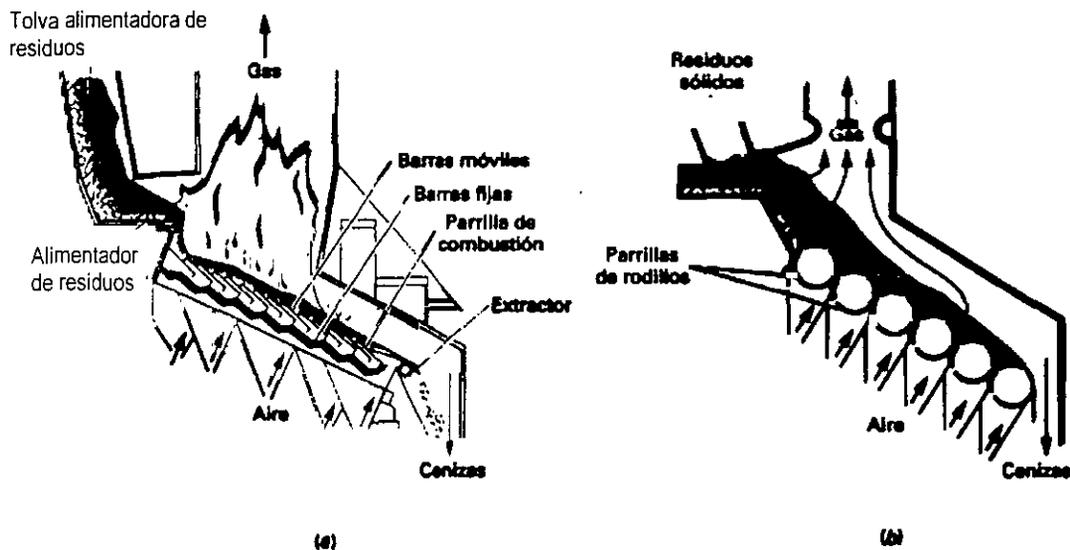


FIG. 7. SISTEMAS DE PARRILLAS UTILIZADO EN INCINERADORAS PARA QUEMADO EN BRUTO DE RSM: a) PARRILLA MARTIN Y b) PARRILLA DUSSELDORF.

Sistemas de incineración alimentados por CDR. En las incineradoras alimentadas por CDR, normalmente, se quema el CDR sobre una alimentadora de parrilla móvil. La parrilla proporciona una plataforma en la que el CDR puede quemarse teniendo en cuenta la introducción de aire secundario para provocar turbulencias y una combustión uniforme. Los mejores resultados se han obtenido con sistemas de incineración específicamente diseñados para CDR, pero algunas calderas alimentadas con carbón han sido modificadas con éxito para quemar CDR o mezclas CDR/carbón (ver Figura 8). Comparado con la naturaleza variable de los RSM en bruto, el CDR puede producirse con una calidad satisfactoria para cumplir las especificaciones de energía, humedad y contenido en cenizas. El CDR se puede producir en forma triturada o fibrosa, o en pelets densificados. El CDR densificado (CDR) es más costoso de producir, pero más fácil de transportar y almacenar. Cualquiera de las formas puede quemarse aisladamente o mezclada con carbón.

Por el mayor contenido energético del CDR comparado con los RSM en bruto, los sistemas de incineración alimentados con CDR pueden ser físicamente más pequeños que los sistemas de combustión en bruto valorados comparativamente.

Un sistema alimentado por CDR también puede ser controlado más eficazmente que un sistema de combustión en bruto por la naturaleza más homogénea del CDR, permitiendo un mejor control de la combustión y un mejor rendimiento de los dispositivos para controlar la contaminación del aire. Además, un sistema de separación primaria correctamente diseñado puede separar porciones importantes de metales, plásticos y otros materiales que pueden contribuir a la producción de emisiones contaminantes.

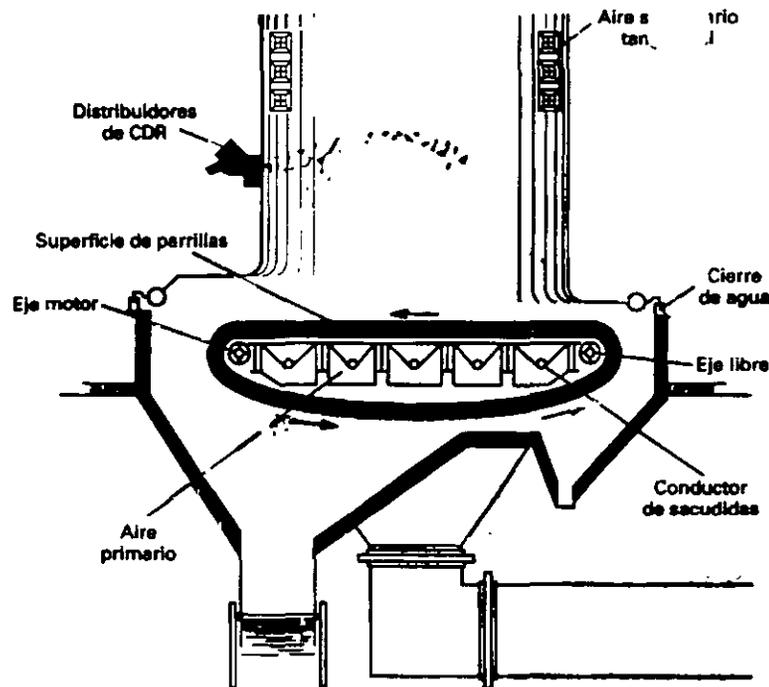


FIG. 8. SECCIÓN A TRAVÉS DE UNA INCINERADORA MODERNA ALIMENTADA CON CDR CON ALIMENTADOR DE PARRILLA MÓVIL.

Incineración con lecho fluidizado

La incineración con lecho fluidizado (ILF) es una alternativa a los sistemas convencionales de incineración. En su forma más sencilla, un sistema ILF consiste en un cilindro vertical de acero, normalmente forrado con refractario; un lecho de arena, una placa rejilla de apoyo y toberas de inyección de aire (ver Figura 9). Cuando se fuerza el aire hacia arriba a través de las toberas, el lecho se fluidiza y se expande hasta dos veces su volumen en reposo. Se pueden inyectar combustibles sólidos como carbón o CDR en el reactor por encima o por debajo del lecho fluidizado. La acción <<hirviente>> de lecho fluidizado provoca turbulencias y favorece la mezcla, y transfiere calor al combustible. Cuando se pone en funcionamiento se utiliza combustible auxiliar (gas natural o aceite combustible) para subir la temperatura del lecho hasta la temperatura operacional (790 a 950°C). Después del arranque, normalmente no hace falta combustible auxiliar; de hecho, el lecho permanece caliente hasta 24 horas, lo que permite un arranque rápido sin combustible auxiliar.

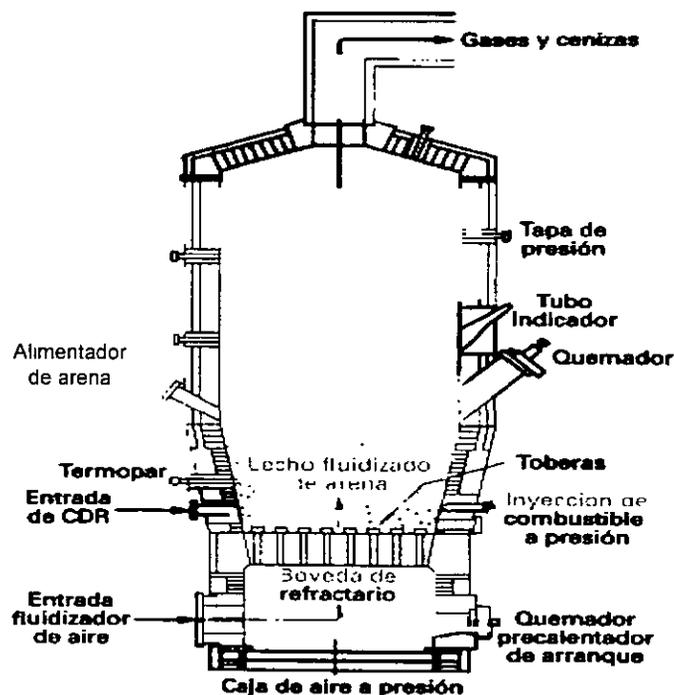


FIG. 9. SISTEMA DE INCINERACIÓN CON LECHO FLUIDIZADO PARA COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS

Los sistemas ILF son bastante versátiles y pueden operarse sobre una amplia variedad de combustibles, incluyendo RSM, fangos, carbón, y numerosos residuos químicos. El material del lecho puede ser arena o caliza (CaCO_3). Cuando se utiliza caliza, ésta reacciona con el oxígeno y el dióxido de azufre (SO_2), producido por la combustión de residuos que contienen azufre, para emitir dióxido de carbono y formar sulfato de calcio (CaSO_4), un sólido que se puede separar con la ceniza. El uso de caliza para el material del lecho permite la combustión de carbón con un alto contenido de azufre y tener mínimas emisiones de dióxido de azufre.

Actualmente están siendo utilizados varios sistemas ILF para la incineración de residuos sólidos en todo el mundo. Una de las primeras instalaciones fue una pequeña unidad de lecho fluidizado (150 t/d) en Lausanne, Suiza. Se utiliza para el tratamiento conjunto de RSM y fangos deshidratados procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Una caldera aprovecha el calor para generar vapor, que se utiliza para calefacción y generación de electricidad. En Duluth, Minnesota, se construyó una planta a escala más grande (700 t/d). Se utiliza la planta para tratar 300 t/d de fangos deshidratados de plantas de tratamiento de aguas residuales y 400 t/d de RSM. Los RSM son procesados con un sistema primario antes de la incineración (ver Figura 10). Un sistema ILF está funcionando también en Fujisawa, Japón. El sistema emplea un diseño en propiedad de lecho fluidizado-lecho móvil, que permite el quemado en bruto de RSM no procesados.

Sistemas para la recuperación de calor

Casi todos los nuevos sistemas para la incineración de residuos sólidos actualmente bajo construcción en Estados Unidos y Europa emplean alguna forma de recuperación energética para ayudar a sufragar los costos operacionales y reducir los costos de inversión del equipamiento para el control de la contaminación aérea. La energía se puede recuperar a partir de los gases calientes de combustión generados incinerando RSM o CDR mediante dos métodos:

- Cámaras de combustión con pantallas.
- Calderas de calor residual.

Puede producirse agua caliente o vapor. El agua caliente puede utilizarse para aplicaciones industriales a baja temperatura o para calefacción central. El vapor es más versátil porque puede utilizarse para calefacción y para generación de energía eléctrica. Los ingresos resultantes pueden pagar parcialmente los costos operacionales del sistema.

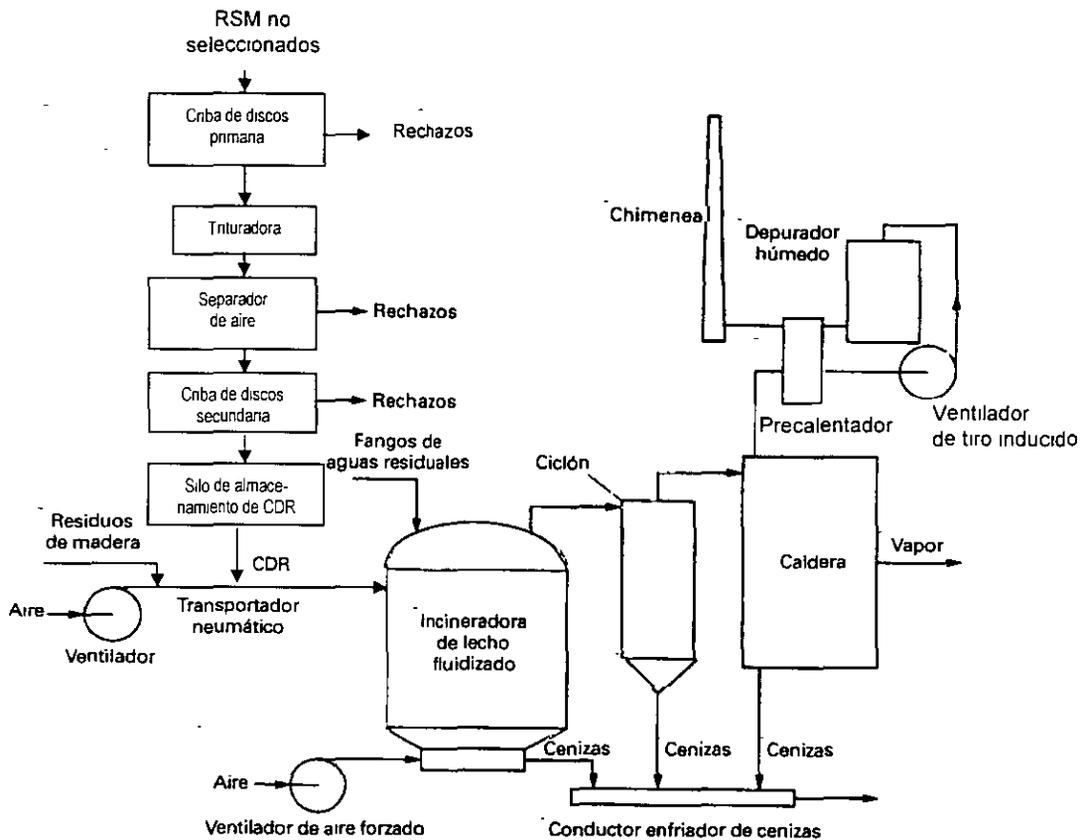


FIG. 10. ESQUEMA DE DULUTH, MINNESOTA, SISTEMA CON LECHO FLUIDIZADO PARA LA COMBUSTIÓN DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES, COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS Y RESIDUOS DE MADERA

La recuperación de calor también tiene un efecto beneficioso en la reducción de los costos de inversión y operación del equipamiento para el control de la contaminación atmosférica. En la práctica, cuando se utilizan sistemas para la incineración de RSM sin equipamiento para la recuperación de calor, se ha visto la necesidad de proporcionar del 100 hasta el 200 por 100 de aire en exceso para llegar a las condiciones de combustión y turbulencia y para controlar la escorificación y acumulación de otros materiales en las paredes de la incineradora. El gran flujo resultante de los gases de combustión hace caro el uso de tales sistemas por la capacidad extra necesaria en el equipamiento para el control de la contaminación del aire. En contraste, cuando se utilizan sistemas para la recuperación del calor, resulta adecuada la aplicación de un 50 hasta un 100 por 100 de exceso de aire, reduciendo así el tamaño de los dispositivos que controlan la contaminación del aire. El enfriamiento de los gases de combustión, que se produce durante la recuperación de calor, también reduce todavía más el volumen de los gases de combustión.

Cámara de combustión con pantalla de agua. En este método, las paredes de la cámara de combustión se forran con tuberías de caldera que se disponen verticalmente y se sueldan en secciones continuas. El agua que corre a través de estos tubos absorbe el calor generado en la cámara de combustión y genera vapor. Normalmente las zonas en la pared del horno adyacentes a las parrillas se forran con materiales refractarios (resistentes al calor) para proteger los tubos de las temperaturas excesivas y de la abrasión mecánica.

Caldera de calor residual. En este método, la cámara de combustión del horno está forrada con materiales refractarios aislantes para reducir las pérdidas caloríficas a través de las paredes del horno. Los gases calientes de la combustión se pasan a través de una caldera de calor residual aparte, localizada externamente a la cámara de combustión. Se utiliza este método de recuperación de calor comúnmente en unidades de incineración modular, que se tratan más

adelante. En algunos casos, se puede añadir una caldera de calor residual a un horno existente revestido en refractario. (ver Figura 11)

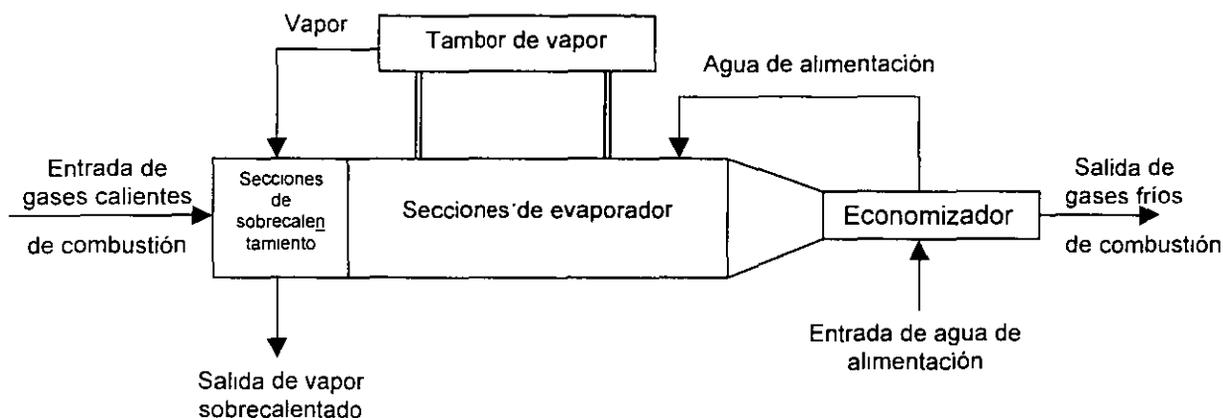


FIG. 11. CALDERA DE CALOR RESIDUAL PARA RECUPERAR CALOR DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Análisis. Un sistema para la recuperación de calor es esencialmente un cambiador de calor. El calor de los residuos quemados es transferido a un fluido productivo (agua) mediante un gradiente de temperatura entre los gases de combustión y el fluido productivo. El diseño y el análisis del sistema de traspaso de calor es esencialmente el mismo que para una planta térmica que queme carbón o aceite.

Se puede hacer un análisis simplificado mediante el uso de tasas de producción de vapor, que relacionan la producción de vapor con el contenido energético de los residuos. Como se muestra en la Tabla 2, las tasas de producción de vapor, varían de 1,5 a 4,3 t vapor/t residuos, según los contenidos energéticos y en humedad de los residuos.

TABLA 2
TASAS DE PRODUCCIÓN DE VAPOR PARA LA INCINERACIÓN DE RSM

	Contenido energético, tal como recibido, HHV, Kcal/kg				
	3,627	3,348	2,790	2,232	1,674
Calidad de RSM					
Humedad porcentaje	15.0	18.0	25.0	32.0	39.0
No combustible, porcentaje	14.0	16.0	20.0	24.0	28.0
Combustible, porcentaje	71.0	66.0	55.0	44.0	33.0
Vapor generado					
t/t de RSM	4.3	3.9	3.2	2.3	1.5

Criterios para la selección del sistema

La selección de un sistema de procesamiento térmico es una labor compleja y económicamente costosa. La mayoría de los sistemas se construyen con algún tipo de contrato <<llave en mano>>, donde un solo contratista asume la total responsabilidad del diseño y de la construcción del sistema. Alternativamente, se construyen algunos sistemas bajo un contrato de servicio total en el que el contratista diseña, construye y opera el sistema durante un número de años fijo.

Criterios ingenieriles de rendimiento. Los ingenieros ambientales juegan un papel intermedio en el proceso de elegir el sistema con la preparación de una serie de especificaciones ingenieriles de rendimiento, que definen el rendimiento del sistema en vez de los detalles de las tecnologías específicas, como el tipo de parrilla o el sistema para manejar cenizas. Las especificaciones de rendimiento dan lugar a un sistema más rentable, porque amplían la competencia y motivan el avance técnico de la industria. En la Tabla 3 se listan algunos criterios de rendimiento. Estos incluyen productividad, confiabilidad, reducción en volumen y peso, emisiones de aire, producción de energía, necesidades de espacio y necesidades de servicios públicos.

Criterios de rendimiento económico. El rendimiento económico de un sistema de procesamiento térmico también debe evaluarse para elegir entre sistemas

competitivos. La mejor forma de comparar alternativas es mediante el uso del financiamiento del ciclo vital, que conforma los costos de operación y mantenimiento durante toda la vida del sistema. La industria de residuos sólidos ha desarrollado un acercamiento estándar hacia el costeamiento del ciclo vital, conocido como declaración de ingresos proforma. Se utiliza una aproximación del valor neto presente para normalizar los costos de capital y de operación e ingresos, a una base temporal de <<año cero>>, permitiendo así la valoración de los costos en una base de dólar por tonelada.

TABLA 3
CRITERIOS DE RENDIMIENTO PARA LA INCINERACIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Especificación	Unidades	Comentarios
Valoración nominal	T/d	Basado en RSM no seleccionados para sistemas de combustión en bruto o de CDR.
Producción bruta de electricidad	KW	No incluye uso interno de electricidad. Basado en valoración nominal y el contenido energético estándar de RSM o CDR, el cual debe ser especificado.
Producción neta de electricidad	KW	Incluye todos los usos internos y pérdidas.
Disponibilidad	h/año	Tiempo estimado que el sistema estará funcionando, teniendo en cuenta todo el mantenimiento previsto.
Emisiones atmosféricas	g/d	Según regulaciones necesarias para cumplir las normativas federales, estatales y locales sobre la contaminación atmosférica.
Equipamiento para controlar la contaminación atmosférica	---	Especificaciones de equipamiento para controlar la contaminación atmosférica, según sean necesarios para cumplir las normativas sobre emisiones atmosféricas.
Rechazos sólidos	t/d	Estimación de rechazos de cenizas de fondo y cenizas volantes, basada en unidades similares en funcionamiento o en ensayos piloto.
Vertido de aguas residuales	l/d	Estimación de la cantidad y calidad de las aguas residuales.
Mano de obra	Personas	Incluye gestión, operación y mantenimiento.
Costos de inversión y todo el equipamiento	\$	Incluye ingeniería, construcción y costos de mano de obra en el lugar, estructuras.
Costos operacionales	\$/año	Incluye mano de obra, mantenimiento rutinario y arreglos, servicios públicos y costo de evacuación de los rechazos sólidos y las aguas residuales.

4. SISTEMAS DE PIROLISIS

Como se ha definido anteriormente, pirólisis es el procesamiento térmico de residuos en ausencia total de oxígeno. Desafortunadamente, hay mucha confusión en la literatura sobre el tema y muchos sistemas llamados pirólisis realmente son de gasificación. Se usan sistemas de pirólisis y gasificación para convertir los residuos sólidos en combustibles gaseosos, líquidos y sólidos. La diferencia principal entre los dos sistemas consiste en que los sistemas de pirólisis utilizan una fuente de combustible externa para conducir las reacciones endotérmicas de pirólisis en un ambiente libre de oxígeno, mientras que los sistemas de gasificación se sostienen sin aportes externos y usan aire u oxígeno para la combustión parcial de los residuos sólidos.

Descripción del proceso de pirólisis

Como la mayoría de las sustancias orgánicas son térmicamente inestables se puede romper, con un calentamiento en un ambiente libre de oxígeno, mediante una combinación de desintegración térmica y reacciones de condensación en fracciones gaseosas, líquidas y sólidas. Pirólisis es el término utilizado para describir este proceso. Al contrario de los procesos de combustión y gasificación, que son extremadamente exotérmicos, el proceso de pirólisis es altamente endotérmico, requiriendo una fuente de calor externa. Por esta razón, a menudo se utiliza el término destilación destructiva como término alternativo a pirólisis.

Las tres fracciones de componentes más importantes producidas mediante pirólisis son las siguientes:

- Una corriente de gas que contiene principalmente hidrógeno, metano, monóxido de carbono y diversos gases, según las características del material que es pirolizado.
- Una fracción líquida que consiste en un flujo de alquitrán o aceite que contiene ácido acético, acetona, metanol e hidrocarburos oxigenados complejos. Con

un procesamiento adicional, la fracción líquida puede utilizarse como aceite combustible sintético sustituyendo al aceite combustible convencional número 6.

- Coque inferior, que consiste en carbono casi puro más cualquier material inerte originalmente presente en los residuos sólidos.

Para la celulosa, $C_6H_{10}O_5$ se ha sugerido la siguiente expresión como representativa de una reacción de pirólisis:



En la ecuación (.1), los compuestos líquidos de alquitrán o aceite que se obtienen normalmente son representados por la expresión C_6H_8O . Se ha encontrado que la distribución de las fracciones del producto varía drásticamente según la temperatura en la que se lleva a cabo la pirólisis. En la Tabla 4 se presentan datos representativos sobre el producto en función de la temperatura de operación. En la Tabla 5 se dan análisis típicos del gas de pirólisis en función de la temperatura. Se ha estimado que el contenido energético de los aceites pirolíticos es aproximadamente de 20,394 kJ/kg. En condiciones de máxima gasificación, se ha estimado que el contenido energético del gas resultante sería aproximadamente de 26,081 kJ/m³.

TABLA 4
BALANCE DE MASAS DE PIRÓLISIS

Temperatura °C	Residuos kg	Gases, Kg	Acidos y alquitranes pirolíticos, Kg	Coque, kg	Masa considerada, kg
480	100	12.33	61.08	24.71	98.12
650	100	18.64	59.18	21.80	99.62
820	100	23.69	59.67	17.24	100.59
930	100	24.36	58.70	17.67	100.73

TABLA 5
COMPOSICIÓN DE GAS DE PIRÓLISIS EN FUNCIÓN DE TEMPERATURA

Gas	Porcentaje en volumen			
	480°C	650°C	820°C	930°C
H ₂	5.56	16.58	28.55	32.48
CH ₄	12.43	15.91	13.73	10.45
CO	33.50	30.49	34.12	35.25
CO ₂	44.77	31.78	20.59	18.31
C ₂ H ₄	0.45	2.18	2.24	2.43
C ₂ H ₆	3.03	3.06	0.77	1.07
Total	99.74	100.00	10 00	99.99

Problemas operacionales con sistemas de pirólisis para RSM

Únicamente se ha instalado un sistema completo de pirólisis en Estados Unidos. Construido en El Cajón, California, el Occidental Flash Pyrolysis System no logró su principal meta operacional (la producción de un aceite de pirólisis vendible) y cerró después de solamente dos años de funcionamiento.

En la Figura 12 se muestra un diagrama de flujo simplificado. El sistema primario empleó dos etapas de trituración, clasificación neumática, cribado y secado para producir una fracción orgánica muy fina. También se recuperaron los metales férricos, el aluminio y el vidrio utilizando separación magnética, separación por corriente foucault y flotación, respectivamente. La parte del sistema que implicaba la pirólisis consistió en varios lazos interconectados de proceso. Los productos finales eran aceites pirolíticos, gases, coque inferior y ceniza.

Como es de esperar con un sistema tan complejo, se encontraron numerosos problemas operacionales. En un análisis del sistema, el fracaso final se atribuyó a varios factores, incluyendo los siguientes:

- Imposibilidad del sistema primario para cumplir con las especificaciones de pureza para el aluminio y el vidrio, lo que afectó a la rentabilidad del sistema.

- Incapacidad del sistema para producir un aceite de pirólisis vendible. El aceite producido tenía un contenido en humedad del 52 por 100, no el 14 por 100 pronosticado con los resultados de una planta piloto. El exceso de humedad en el aceite disminuyó el contenido energético a 8.374 kJ/kg, frente a los 21,166 kJ/kg pronosticados en los ensayos de la planta piloto.

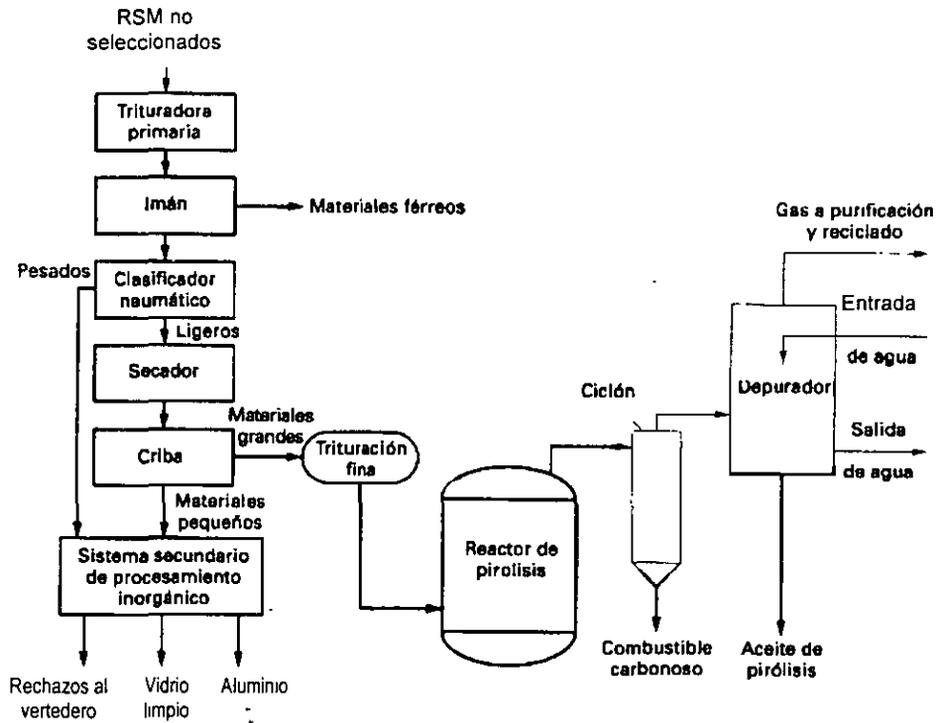


FIG. 12. ESQUEMA DEL OCCIDENTAL FLASH PYROLYSIS SYSTEM PARA LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RSM

Comentario

El sistema de pirólisis aún se usa ampliamente como un proceso industrial para la producción de carbón vegetal a partir de madera, de coque, y gas de coquización a partir de carbón, y de gas combustible y betún a partir de fracciones pesadas de petróleo. A pesar de estos usos industriales, la pirólisis de residuos sólidos no ha sido tan exitosa. La causa principal del fracaso de la tecnología de pirólisis en el pasado parece haber sido la complejidad inherente de los sistemas y la falta de apreciación, por parte de los diseñadores de los sistemas, de las dificultades

asociadas a la producción de una alimentación uniforme a partir de residuos sólidos urbanos.

Aunque algunos sistemas como el Occidental Flash Pyrolysis System no fueron éxitos comerciales produjeron, no obstante, datos valiosos sobre el diseño y el funcionamiento que pueden ser utilizados por los diseñadores en el futuro. Si cambian los costos asociados con la producción de combustibles líquidos sintéticos, la pirólisis puede ser de nuevo un proceso económicamente factible para el procesamiento térmico de los residuos sólidos. Sin embargo, si lo que se desean son combustibles gaseosos, entonces la gasificación es una tecnología más sencilla y rentable.

5. SISTEMAS DE GASIFICACIÓN

Gasificación es el término global utilizado para describir el proceso de combustión parcial en el que un combustible es quemado a propósito con menos aire que el estequiométrico. Aunque el proceso se descubrió en el siglo XIX, sólo recientemente se ha aplicado para el procesamiento de residuos sólidos.

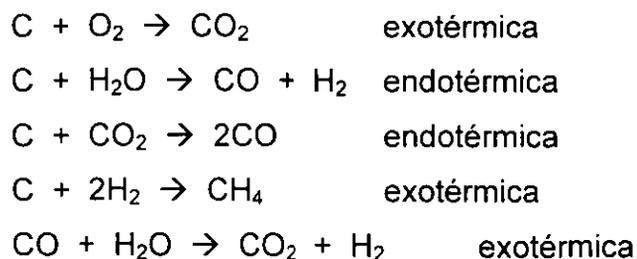
Descripción del proceso de gasificación

La gasificación es una técnica energéticamente eficaz para reducir el volumen de los residuos sólidos y recuperar energía. Esencialmente el proceso implica la combustión parcial de un combustible carbonoso para generar un combustible rico en gas con altos contenidos de monóxido de carbono, hidrógeno y algunos hidrocarburos saturados, principalmente metano. El gas combustible puede quemarse en un motor de combustión interna, turbina de gas o caldera en condiciones de oxígeno adicional. En los siguientes párrafos se explica brevemente el desarrollo histórico y la teoría básica del funcionamiento del proceso de gasificación.

Desarrollo histórico. Desde el siglo XIX se han utilizado los gasificadores. Los primeros gasificadores de carbón fueron construidos en Alemania por Bischof, 1839, y por Siemens, 1861. Los gasificadores de Siemens se utilizaban principalmente para proporcionar combustible a hornos de industria pesada. El desarrollo del equipamiento de limpieza y enfriamiento de gas por Dowson en Inglaterra, 1881, extendió el uso de gasificadores a hornos pequeños y motores de combustión interna.

Para principios de siglo la tecnología de gasificadores había avanzado hasta el punto de cualquier tipo de rechazos celulósicos, como pepitas de aceitunas, paja y cáscaras de nueces, podían ser gasificados. Estos primeros gasificadores se utilizaron principalmente para proporcionar combustible a motores de combustión interna fijos para el molido y otros usos agrícolas. A principios de siglo también se desarrollaron los gasificadores portátiles. Se usaban en barcos, automóviles, camiones y tractores. El verdadero impulso para el desarrollo de la tecnología de los gasificadores fueron las escasez de gasolina durante la Segunda Guerra Mundial. Durante los años del conflicto, Francia tenía más de 60,000 coches alimentados por carbón vegetal y Suecia tenía cerca de 75,000 autobuses, coches, camiones y barcos equipados con gasificadores quemando madera. Con la vuelta de la gasolina y del gasóleo relativamente baratos y abundantes después de la Segunda Guerra Mundial, casi se olvidó la tecnología de gasificadores.

Teoría sobre gasificación. Durante el proceso de gasificación, se producen cinco reacciones principales:



El calor necesario para sostener el proceso se obtiene de las reacciones exotérmicas, mientras que los componentes de la combustión son generados principalmente por las reacciones endotérmicas.

Cuando un gasificador está funcionando a presión atmosférica con aire como oxidante, los productos finales del proceso de gasificación son un gas de bajo poder calorífico que normalmente contiene (en volumen) un 10 por 100 de CO₂, un 20 por 100 de CO, un 15 por 100 de H₂ y un 2 por 100 de CH₄ en el balance, siendo el resto N₂; un coque que contiene carbono y los inertes originalmente en el combustible; y líquidos condensables parecidos al aceite pirolítico. Debido al efecto diluyente del nitrógeno en el aire de entrada, el gas de bajo poder calorífico tiene un contenido energético de aproximadamente 5,600 kJ/m³. El funcionamiento de los gasificadores refinados al aire es bastante estable, produciendo una calidad de gas bastante constante en una amplia gama de tasas de entrada de aire. La habilidad para operar bajo distintas condiciones de carga se conoce como relación de rechazo. Cuando se va a usar oxígeno puro como oxidante en vez de aire, como en el sistema Purox® (descrito más adelante), puede producirse un gas de un poder calorífico medio con un contenido energético de aproximadamente 11,200 kJ/m³.

Tipos de gasificadores

Hay cinco tipos básicos de gasificadores:

- De lecho fijo vertical
- De lecho fijo horizontal
- De lecho fluidizado
- De hogar múltiple
- De horno rotario

Como se han utilizado más los tres primeros tipos, éstos se describen brevemente a continuación.

Lecho fijo vertical. El gasificador de lecho fijo vertical tiene algunas ventajas sobre los otros tipos de gasificadores, incluyendo su simplicidad y los costos de inversión relativamente bajos. Sin embargo, este tipo de reactor es más sensible a las características mecánicas del combustible; requiere un combustible uniforme, homogéneo, como el CDR densificado. Como se muestra en la Figura 13, el flujo del combustible a través del gasificador se produce por gravedad, con el aire y el combustible fluyendo conjuntamente a través del reactor. Los productos finales del proceso son principalmente gas de bajo poder calorífico y coque. Es posible operar un reactor de lecho fijo vertical con un flujo contracorriente, con el aire y el gas subiendo a través del reactor.

Se ha comprobado a escala piloto el funcionamiento de un gasificador de lecho fijo vertical utilizando CDR densificado como combustible. El gasificador fue operado a una baja temperatura (650 a 815°C) en forma no escoriificada, produciendo un gas de bajo poder calorífico (aproximadamente 2.800 kJ/m³), una pequeña cantidad de condensado líquido y una ceniza y coque secos y grandes. El coque demostró tener unas características de adsorción similares al carbono activo comercial y puede ser útil para el tratamiento avanzado de aguas residuales.

El gas de bajo poder calorífico producido por el sistema fue probado en un motor diesel Ford de tres cilindros. El motor solamente necesitaba unas pequeñas modificaciones para funcionar con una combinación de gas de bajo poder calorífico (80 por 100 de la entrada de energía) y combustible diesel (20 por 100 de la entrada de energía). Con ensayos se encontró que el motor modificado consiguió el 76 por 100 del rendimiento que el mismo motor consigue con el 100 por 100 de combustible diesel.

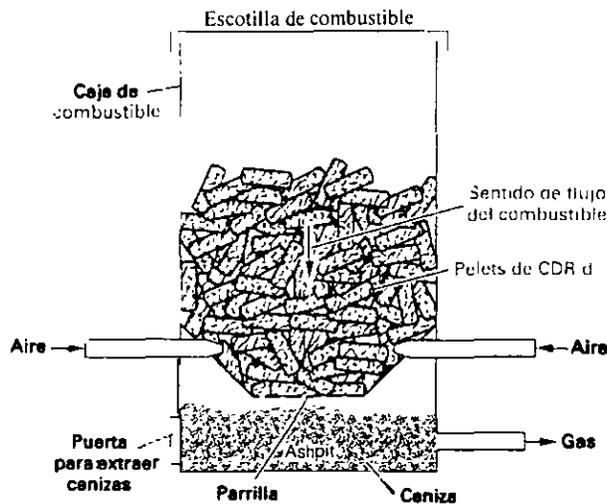


FIG. 13. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO VERTICAL DE ALIMENTACIÓN EN LOTES

Los gasificadores pueden conseguir bajas emisiones gaseosas contaminantes con dispositivos simples para el control de la contaminación atmosférica. Los resultados de los ensayos de emisiones gaseosas, utilizando el dispositivo mostrado en la Figura 14, son presentadas en la Tabla 6. El dispositivo simula la combustión de un gas de bajo poder calorífico en una caldera mediante la combustión del gas con un sistema de combustión retardada. Se utilizó un ciclón sencillo de alta eficacia para controlar las partículas antes de la combustión retardada. Las emisiones son comparables o menores que las emisiones de los sistemas de combustión con oxígeno en exceso, que emplean sistemas mucho más complejos para el control de las emisiones.

Los gasificadores de lecho fijo vertical también pueden operarse con oxígeno puro como oxidante en vez de aire. La operación con oxígeno puro provoca la producción de un gas de poder calorífico medio con un contenido energético de 270 a 2,990 kJ/m^3 y una composición media del gas de un 50 por 100 de CO, 30 por 100 de H_2 , 14 por 100 de CO_2 , 4 por 100 de CH_4 , 1 por 100 de hidrocarburos y

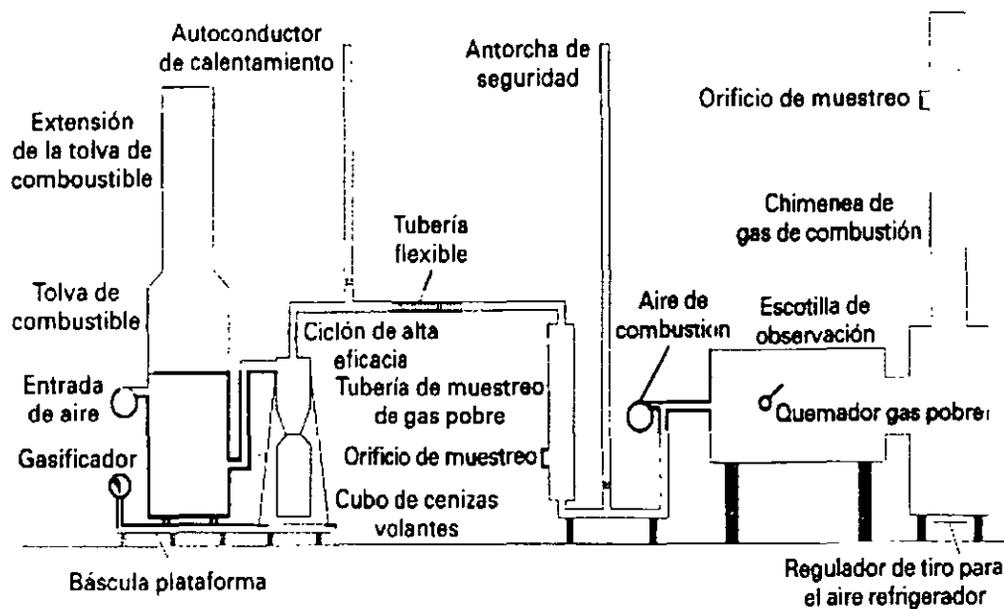


FIG. 14. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA DE ENSAYO DE EMISIONES PARA UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE GASIFICADOR CON COMBUSTIBLE DERIVADO DE RESIDUOS

TABLA 6
EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE GASIFICADORES

Emisión	Unidad	Valores
NO _x	ppmv	60-115
SO ₂	g/m ³ · N	0.091-0.227
Hidrocarburos no condensables	ppmv	<1
Tasa total de emisión de partículas (Método 5 de la EPA)	g/m ³ · N	0.068-0.164
Diámetro de partícula	µm	8

1 por 100 de N_2 . Un sistema semejante fue desarrollado por la Corporation Union Carbide y puesto en el mercado como sistema Purox®. Como se puede ver en la Figura 15, el sistema estaba formado por un reactor, un sistema primario mínimo (solamente trituración), un tren de limpieza de gas (precipitador electrostático, absorbedor de ácido, condensador y purificador de agua) y una planta de oxígeno. El gasificador funcionó a temperaturas relativamente altas (1.425 a 1.450°C), produciendo una escoria líquida como subproducto. Aunque se ensayó una planta piloto con éxito utilizando diversos tipos de residuos, incluyendo los RSM y los lodos de aguas negras, el sistema Purox® ya no se encuentra en producción comercial.

Lecho fijo horizontal. El gasificador de lecho fijo horizontal se ha convertido en el tipo más disponible comercialmente. Irónicamente no es conocido normalmente como gasificador, sino por los términos: incineradora de aire restringido (incineradora), incineradora de aire controlado, o incinerador pirolítica. El término utilizado en esta sección es unidad de combustión modular (UCM)

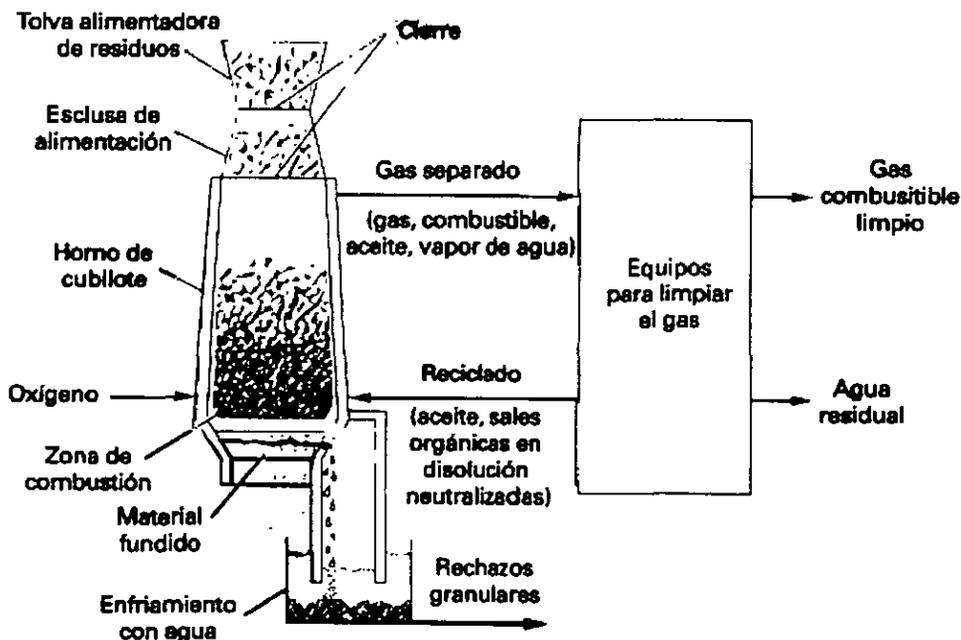


FIG. 15. DIAGRAMA DEL SISTEMA PUROX® DE GASIFICADOR ALIMENTADO POR OXÍGENO PARA RSM NO SELECCIONADOS

Una UCM, como se muestra en la Figura 16, está formada por dos componentes importantes: una cámara de combustión primaria y una cámara de combustión secundaria. En la cámara primaria, los residuos se gasifican mediante una combustión parcial en condiciones subestequiométricas, produciéndose un gas de bajo poder calorífico que después fluye a la cámara de combustión secundaria, donde se quema con oxígeno adicional. La combustión secundaria produce gases de altas temperaturas (650 a 870°C) de combustión completa (CO_2 , H_2O , N_2) que se pueden utilizar para producir vapor o agua caliente en una caldera adjunta de calor residual. Una menor velocidad y turbulencia en la cámara de combustión primaria minimiza el arrastre de las partículas en la corriente de gas que conduce a unas emisiones de partículas más bajas que en las incineradoras convencionales de oxígeno adicional.

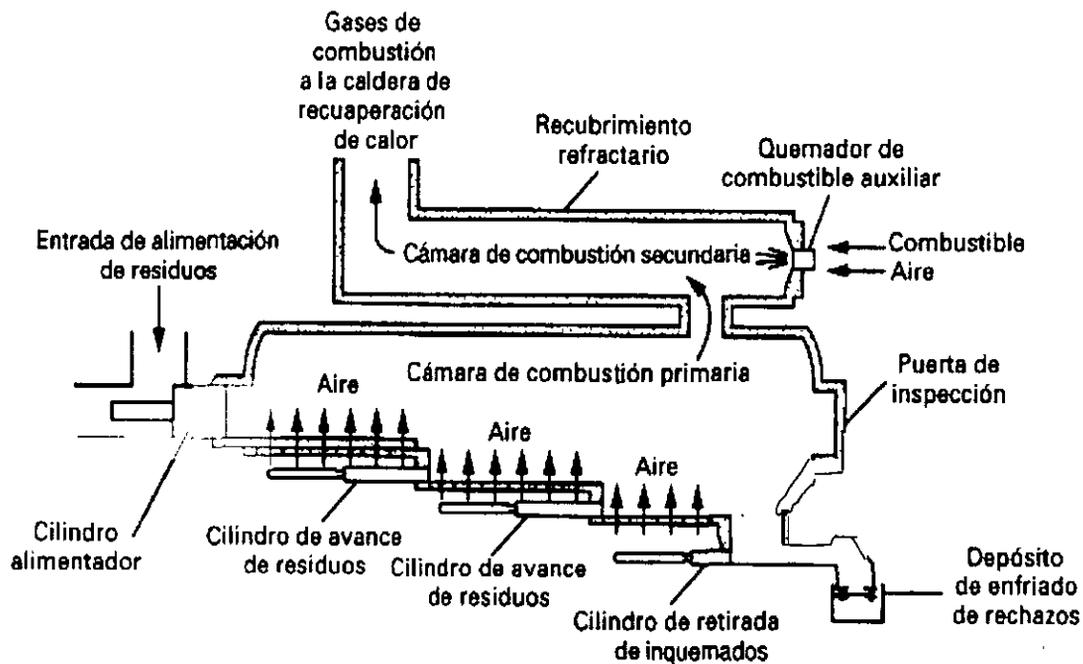


FIG. 16. UNIDAD DE COMBUSTIÓN MODULAR UTILIZADA PARA RSM DOMÉSTICOS Y COMERCIALES Y PARA RESIDUOS INDUSTRIALES SELECCIONADOS

Las UCM están disponibles comercialmente por varios fabricantes en tamaños estandarizados que varían en capacidad entre 45 y 3,800 kg/h. Las unidades son montadas en fábrica y transportadas en camión o ferrocarril hasta el lugar del proyecto, donde requieren un trabajo in situ mínimo para su instalación. Las UCM más grandes tienen alimentación continua y separación de cenizas. Las unidades más pequeñas operan de forma discontinua y son cargadas manualmente. Normalmente se cargan durante el día laboral y los lotes se queman solos en la instalación durante la noche.

Cuando se instalan calderas para la recuperación del calor, el vapor o el agua caliente producidos deben estar unidos cuidadosamente a un consumidor cercano. Algunas aplicaciones incluyen la incineración de residuos de madera en una fábrica de madera laminada, donde se aprovecha el vapor en el proceso de producción, y la incineración de RSM en un polígono industrial pequeño, donde se utiliza el vapor para la calefacción y el aire acondicionado de los edificios cercanos industriales y de oficinas.

Lecho fluidizado. El uso de la combustión en lecho fluidizado para la incineración de RSM con aire en exceso se ha tratado anteriormente. Con modificaciones mínimas, se puede operar un sistema de combustión de lecho fluidizado en forma subestequiométrica como gasificador. Se han llevado a cabo varios ensayos a escala piloto con RSM como combustible. En Kingston, Ontario, se ha probado un prototipo de gasificador de lecho fluidizado de 1 t/h alimentado por CDR. En Japón se ha desarrollado un gasificador de lecho fluidizado dual. El sistema emplea dos lechos fluidizados, uno para el combustible y otro para la combustión del coque, utilizando arena como medio de transferencia de calor entre los dos lechos y produciendo un gas de poder calorífico medio. En Italia se ha construido un sistema de gasificador de lecho fluidizado utilizando CDR. El sistema produce gas de bajo poder calorífico que se utiliza en las calderas para la producción de vapor y electricidad.

Comentario

La experiencia con unidades a escala real y a escala piloto ha demostrado que no se han conseguido resultados confiables con gasificadores de combustión en bruto. Es necesaria alguna forma de procesamiento del CDR para separar los metales y otros inertes con el fin de mejorar el rendimiento de los reactores y reducir las emisiones atmosféricas. Excepto para las unidades de combustión modular, los sistemas de gasificación actualmente no pueden considerarse como una tecnología comercial. Debido a sus bajas emisiones atmosféricas, comparadas con las de los sistemas de incineración con oxígeno adicional, los gasificadores de lecho fijo vertical y de lecho fluidizado pueden tener un mayor potencial para su desarrollo en el futuro y podrían, de nuevo, ser <<redescubiertos>>.

6. SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL

El funcionamiento de sistemas de recuperación térmica produce diversos impactos sobre el ambiente, incluyendo emisiones gaseosas y de partículas, rechazos sólidos y efluentes líquidos. El diseño correcto de los sistemas de control para estas emisiones es una parte crítica del diseño de un sistema de procesamiento térmico. En algunos casos, el costo y la complejidad de un sistema de recuperación térmica. En esta sección se presenta una introducción a estos impactos ambientales y a las tecnologías de control para gestionarlos.

Emisiones atmosféricas

El Acta Federal del Aire Limpio obligó a la Agencia para la Protección Ambiental (EPA) a la identificación de los contaminantes con una importancia específica. Se recogieron datos científicos sobre las relaciones entre diversas concentraciones de contaminantes atmosféricos y sus efectos adversos para los humanos y el ambiente. Esta información fue utilizada para preparar una lista de criterios de contaminación y de niveles ambientales aceptables. Estos niveles son conocidos como Normas sobre la Calidad del Aire Ambiental. Los contaminantes de criterio

identificados incluyen: monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono, materia aspirable en partículas (también conocida como PM10) y plomo. Además de estos contaminantes, EPA ha identificado otros contaminantes atmosféricos preocupantes, pero todavía no ha establecido Normativas de Aire Ambiental para ellos. Estos contaminantes son conocidos colectivamente como contaminantes no-clasificados. En esta sección se proporcionan breves descripciones de los contaminantes clasificados y de los más significativos contaminantes aún no clasificados.

Óxidos de nitrógeno (NO_x). Los dos óxidos de nitrógeno más importantes son NO (monóxido de nitrógeno) y NO₂ (dióxido de nitrógeno), colectivamente llamados NO_x. Hay dos fuentes principales de NO_x en la combustión. El NO_x térmico se forma mediante reacciones entre el nitrógeno y el oxígeno en el aire utilizado para la combustión. El NO_x combustible se forma mediante reacciones entre oxígeno y nitrógeno orgánico en el combustible. Los óxidos de nitrógeno son precursores de la formación de ozono (O₃) y peroxi-acetonitrilo (PAN), oxidantes fotoquímicos conocidos como smog (niebla con humo). Los óxidos de nitrógeno también contribuyen a la formación de aerosoles nítricos (gotas líquidas) que pueden causar niebla y lluvia ácida.

Dióxido de azufre (SO₂). El dióxido de azufre se forma mediante la combustión de combustibles que contienen azufre. El dióxido de azufre es un gas irritante para los ojos, la nariz y la garganta. En altas concentraciones puede causar enfermedades o la muerte en personas ya afectadas por problemas pulmonares como asma o bronquitis. El dióxido de azufre se relaciona con la producción de lluvia ácida que afecta a lagos, ríos y bosques.

Monóxido de carbono (CO). El monóxido de carbono, formado durante la combustión de materiales carbonosos cuando existe una insuficiencia de oxígeno, reacciona con la hemoglobina en la corriente sanguínea para formar carboxihemoglobina (HbCO). El cuerpo humano confunde la HbCO con la

oxihemoglobina (HbO₂), que normalmente transfiere el oxígeno a los tejidos vivos a través del cuerpo. La falta de oxígeno puede causar dolores de cabeza, náuseas e incluso la muerte en concentraciones extremadamente altas.

Materia particulada (MP). Se forma la materia en partículas durante la combustión mediante varios procesos incluyendo la combustión incompleta del combustible y el arrastre físico de los no combustibles. Las emisiones de partículas causan reducciones en la visibilidad y efectos sobre la salud. Las partículas pequeñas de 10 µm (10 · 10⁻⁶ m) son críticas porque pueden aspirarse profundamente en los pulmones. En la Figura 17 el tamaño relativo de estas partículas se compara con otros polvos. En la Figura 18 se resumen las emisiones de partículas desde varias instalaciones. Hay que resaltar que aproximadamente del 20 al 40 por 100 de las emisiones de partículas son de menos de 10 µm de diámetro.

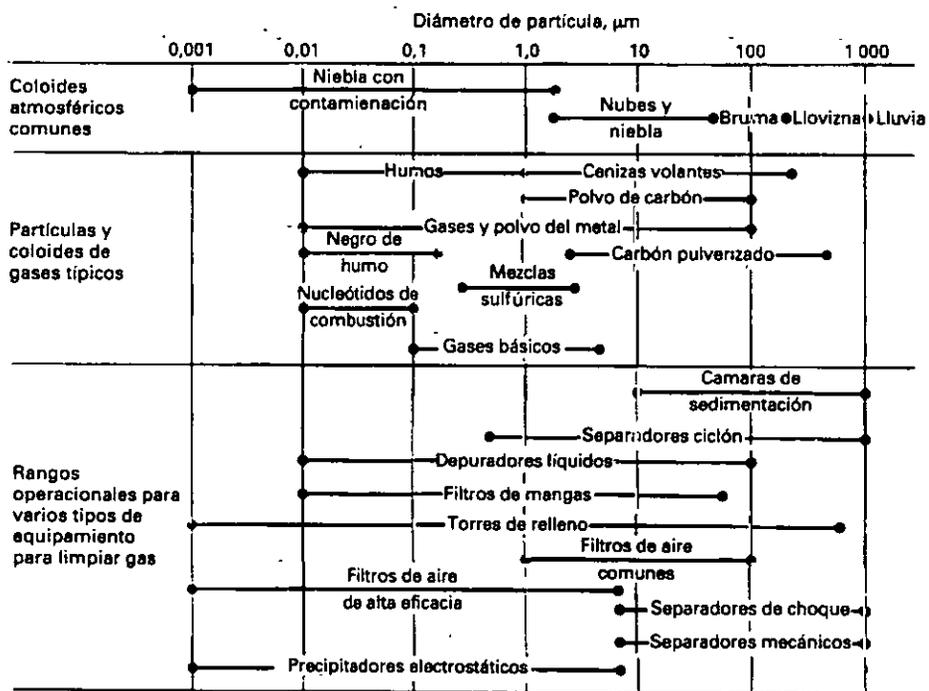


FIG. 17. CLASIFICACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS

Metales. Los residuos sólidos municipales son una mezcla heterogénea. Muchos artículos relativamente inocuos, tales como plásticos, revistas de lujosa presentación y pilas de linterna, contienen elementos metálicos. En la Tabla 7 se comparan las concentraciones de metales en el aceite y el carbón. Para la mayoría de los metales las concentraciones son superiores en los RSM. Los metales que plantean las mayores inquietudes desde el punto de vista de la salud pública son: cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb). Después de la incineración los metales se emiten o bien como materia en partículas o bien vaporizados en su forma gaseosa. El mercurio es un problema especial a este respecto, porque se volatiliza a una temperatura relativamente baja, 329°C.

Algunos metales se concentran en pocos productos de consumo y podrían separarse del flujo de residuos antes de la incineración. Por ejemplo, casi todo el mercurio de los RSM se debe a la evacuación de pilas domésticas de celda seca (tipos mercurio, alcalina y cinc-carbono). Se puede atribuir una cantidad más pequeña del mercurio a la evacuación de termómetros domésticos rotos. La separación en origen o de depósito reduciría sustancialmente la carga de mercurio en el ambiente.

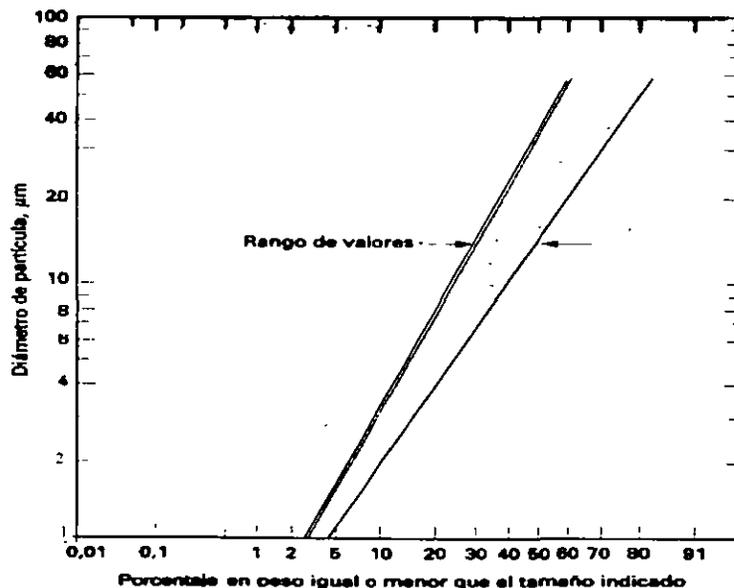


FIG. 18. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE CENIZAS VOLANTES PROCEDENTES DE INCINERADORAS DE RSM

TABLA 7
METALES EN ACEITE, CARBÓN Y RSM

Valores en (µg/MJ) en la combustión									
Metal	Aceite			Carbón			RSM		
	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio
As	nr	nr	nr	20.3	1,501.0	331.0	23.0	1,392	380
Be	nr	nr	nr	4.2	1,550.0	171.0	nd	nd	nd
Cd	nr	nr	nr	1.9	1,001.0	110.0	17.4	3,538	702
Cr	0.26	7.4	3.2	186.0	3,367.0	1,017.0	280.0	125,623	15,102
Cu	1.1	26.0	4.6	138.0	1,218.0	510.0	1,046.0	180,039	26,237
Hg	nr	nr	nr	2.3	96.7	18.7	<130.0	362	166
Mn	0.69	9.4	3.6	47.0	4,753.0	2,081.0	1,059.0	48,022	15,419
Mo	0.50	4.3	1.4	35.5	390.0	173.0	59.8	2,982	938
Ni	9.7	317.0	251.0	104.0	2,131.0	677.0	90.0	51,564	6,380
Pb	3.1	28.7	13.9	83.0	3,084.0	738.0	877.0	136,663	39,290
Sb	nr	nr	nr	2.7	537.0	98.4	30.1	5,404	2,152
Se	nr	nr	nr	9.2	542.0	109.0	8.1	237	61.4
Sn	2.6	57.3	16.2	10.2	710.0	153.0	80.9	8,179	2,466
V	5.2	358.0	129.0	342.0	3,341.0	1,401.0	586.0	5,988	2,432
Zn	5.0	42.6	17.8	186.0	8,825.0	1,582.0	3,018.0	303,716	60,943

Gases ácidos. La incineración de residuos que contiene flúor y cloro genera gases ácidos, como el fluoruro de hidrógeno (HF) y el cloruro de hidrógeno (HCl). Se encuentran cantidades traza de flúor en muchos productos, mientras que el cloro se localiza principalmente en los plásticos, sobre todo en el policloruro de vinilo (PVC), el poliestireno (PS) y el polietileno (PE).

La incineración de residuos que contienen azufre y nitrógeno también puede provocar la formación de gases ácidos. El SO₂ puede oxidarse para formar SO₃ y más tarde reaccionar con las gotas de agua en la atmósfera para formar ácido sulfúrico (H₂SO₄). La emisión de NO₂ puede formar en la atmósfera ácido nítrico (HNO₃).

Dioxinas y furanos. La emisión de compuestos orgánicos de la familia de las dioxinas y furanos se ha convertido en uno de los asuntos más complejos y controvertidos del procesamiento térmico de RSM. Una dioxina es un miembro de la familia de los compuestos orgánicos conocidos como policlorodibenzodioxina

(PCDD). Una molécula de la familia PCDD está formada por una estructura de triple anillo en la que dos anillos del benceno están interconectados por un par de átomos de oxígeno (ver Figura 19a). La familia policlorodibenzofurano (PCDF) tiene una estructura similar, excepto que solamente un átomo de oxígeno une los dos anillos de benceno (ver Figura 19b). Las posiciones numeradas representan átomos de carbono donde los enlaces están libres para unirse a átomos de hidrógeno o cloro. Existen un total de 75 isómeros posibles de PCDD y 135 isómeros de PCDF. En la notación química se refiere a estos isómeros por el número de posición del átomo de cloro. Por ejemplo, el 2,3,7,8-TCDD ó 2,3,7,8-tetracloro-dibenceno-p-dioxina es un PCDD con cuatro átomos de cloro localizados en las posiciones 2, 3, 7 y 8 (ver Figura 20).

La importancia de las familias PCDD y PCDF de compuestos orgánicos radica en que algunos de sus isómeros se encuentran entre las sustancias más tóxicas que existen. Por ejemplo, el LD₅₀ del 2,3,7,8-TCDD para los cobayos es menor que 1 µg/kg de peso corporal. Los isómeros de PCDD y PCDF han sido analizados como contaminantes en diversos productos químicos industriales. Por ejemplo, el herbicida Agent Orange, utilizado como defoliante durante la Segunda Guerra Mundial, se descubrió más tarde que estaba contaminado con cantidades traza de 2,3,7,8-TCDD.

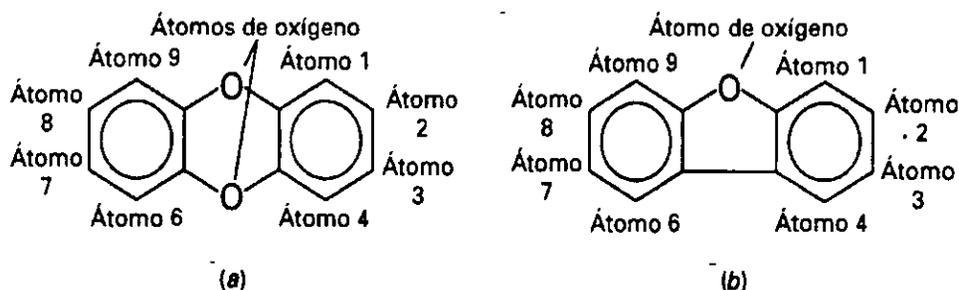


FIG. 19. ESTRUCTURA DE LAS FAMILIAS (a) POLICLORODIBENZODIOXINA (PCDD) Y (b) POLICLORODIBENZOFURANO (PCDF)

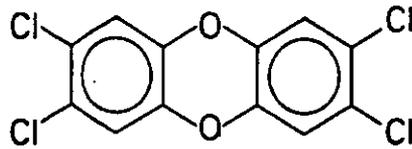


FIG. 20. ESTRUCTURA DEL TETRACLORO-DIBENCENO-P-DIOXINA (2,3,7,8-TCDD)

Aunque existe la evidencia de que los PCDD y los PCDF tienen propiedades cancerígenas (causan cáncer) en animales, recientemente se ha cuestionado su cancerogenicidad potencial en humanos. Según V. N. Houk, del Centro para el Control de Enfermedades (EE.UU.), las dioxinas en altas dosis tienen un bajo riesgo cancerígeno (por ejemplo, en accidentes industriales), pero no son un riesgo cancerígeno en bajas dosis, tal como puede producirse en el aire ambiental cerca de una incineradora de RSM. En cualquier caso, las agencias estatales y EPA han dado una gran prioridad al control de las dioxinas y furanos. Más adelante se tratan las estrategias de control y límites de emisiones para las dioxinas y furanos.

Se sabe que los PCDD y PCDF son emitidos en bajas concentraciones desde los sistemas de incineración que queman RSM y CDR. Hay un debate considerable dentro de las comunidades científicas e ingenieriles acerca de la fuente de estas emisiones. Existen algunas evidencias de que se producen PCDD y PCDF en todos los procesos de combustión, incluso en los hogares domésticos y en estufas de quemar madera.

Los estudios de sedimentos en los Grandes Lagos han mostrado que el flujo de entrada hasta los sedimentos desde la precipitación atmosférica ha ido incrementándose desde los años cuarenta. Las concentraciones de PCDD y PCDF antes de este período de tiempo eran muy bajas, lo que contradice el

argumento de que las emisiones importantes de PCDD y PCDF están causadas por la combustión de madera y carbón. En el mismo estudio se constató una tendencia a la disminución del PCDD y PCDF en los sedimentos desde mediados de los años setenta. El declive fue atribuido a los mejores controles sobre partículas en los sistemas de procesamiento térmico desde la aprobación del Acta de Aire Limpio en 1970.

Todavía no se ha determinado el mecanismo exacto de la formación de PCDD y PCDF en el procesamiento térmico de residuos sólidos. Recientemente se han propuesto tres fuentes de dioxina y furanos en las emisiones procedentes de la incineración de RSM:

- La presencia de dioxinas y furanos en los mismos RSM
- Su formación durante la combustión debido a los compuestos clorados precursores aromáticos
- Su formación durante la combustión procediendo de los hidrocarburos y el cloro.

Las dioxinas pueden entrar en el flujo de residuos como contaminantes en compuestos químicos, tales como los clorofenoles y clorobenzenos que se utilizan en pesticidas, papeles y preservantes de la madera. También se ha sugerido que el clorofenol podría actuar como compuesto precursor en la formación de PCDD y PCDF. Otra hipótesis consiste en que los PCDD y PCDF se sintetizan en el mismo sistema de combustión mediante reacciones entre las ligninas (componente de la madera y el papel) y los compuestos de cloro derivados del policloruro de vinilo (PVC) o de compuestos inorgánicos como NaCl.

Sistemas para el control de la contaminación atmosférica

Las emisiones atmosféricas gaseosas y en partículas procedentes de los sistemas para la recuperación de recursos pueden controlarse en cinco clases de equipamientos:

- Precipitadores electrostáticos, filtros de bolsas, filtros electrostáticos de lecho de grava (control de partículas)
- Separación en origen, controles de combustión, tratamiento de los gases de combustión (control de NO_x)
- Separación en origen, depuración húmeda o seca (control de SO₂ y gas ácido)
- Controles de combustión (control de CO y HC)
- Separación en origen, controles de combustión, control de partículas (control de la contaminación no específica).

Los dispositivos de control se seleccionan para conseguir la eficiencia de separación requerida, que se define como:

$$E = \frac{W_{\text{entrada}} - W_{\text{salida}}}{W_{\text{entrada}}} \cdot 100\%$$

donde:

E = eficiencia de separación, porcentaje

W_{entrada} = Peso de entrada del contaminante

W_{salida} = Peso de salida del contaminante

Equipamiento para controlar partículas. Las partículas finas (<10 μm) se controlan con tres tecnologías:

- Precipitadores electrostáticos (ESP), que funcionan bajo el principio de la atracción electrostática
- Filtros de bolsas, que filtran mecánicamente las partículas a partir de la corriente del gas de combustión
- Filtros electrostáticos de lecho de grava, que combinan las características operacionales de los ESP y de los filtros de bolsas.

Precipitadores electrostáticos. El precipitador electrostático (ESP) fue el primer dispositivo de control de partículas utilizado en las incineradoras de RSM que fue capaz de separar partículas finas (menores de 10 μm) y muy finas (menores de 2 μm). Funciona bajo el principio de la atracción electrostática (ver Figura 21). Un voltaje alto negativo, 20,000 a 100,000 voltios, aplicado a los electrodos de descarga, genera un fuerte campo eléctrico entre los electrodos de descarga y el colector. Las partículas en la corriente de gas adquieren una carga negativa mientras pasan a través del campo eléctrico. Por su carga, las partículas son atraídas hacia el electrodo colector con toma de tierra. Después de ser recogidas sobre las placas, las partículas se separan mediante la vibración mecánica de las placas.

La eficiencia de un ESP está en función de las características de los gases de combustión (especialmente temperatura y humedad) y de la resistividad eléctrica de las partículas. Normalmente la eficiencia de los ESP varía aproximadamente entre un 93 por 100 para partículas muy finas (menos de 2 μm). Aunque este rendimiento es impresionante, no cumple los requisitos de control de emisiones de algunos estados, tales como California, que han fijado unos requisitos más estrictos que las líneas directrices federales. Están desarrollándose nuevos diseños de ESP que consiguen eficiencias de separación de partículas comparables a las de los filtros de bolsas.

Filtro de bolsas. El filtro de bolsas es la tecnología elegida para la mayoría de las incineradoras de RSM recientemente construidas en Estados Unidos. El filtro de bolsas es un dispositivo intrínsecamente sencillo (ver Figura 22). Las bolsas de filtrar se conectan paralelamente sobre una estructura. Las partículas del gas de combustión son atrapadas en una capa de polvo que gradualmente se va acumulando sobre la superficie de la bolsa. La capa de polvo permite que la bolsa filtre partículas tan pequeñas como 0.1 μm , mucho más pequeñas que los espacios abiertos de 50 a 75 μm entre las fibras de la bolsa. Mientras las partículas se acumulan sobre la superficie de la bolsa, aumenta gradualmente la

caída de presión sobre el filtro de bolsas. Las partículas se separan de las bolsas de filtrar mediante muchas técnicas, incluyendo: agitación mecánica, inversión de la corriente de aire y chorro pulsante. En la Figura 22 se ilustra una instalación con filtro de bolsas.

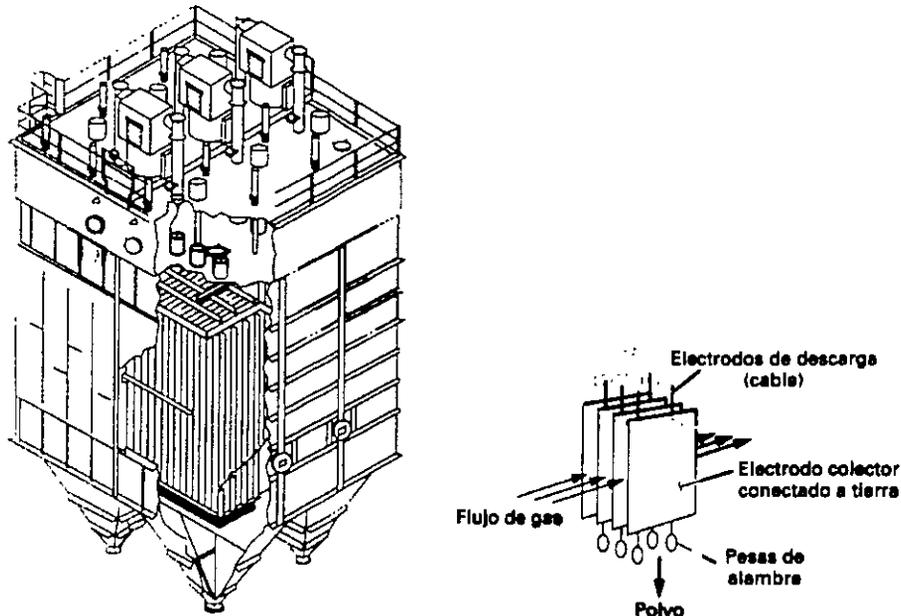


FIG. 21. PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO PARA LA SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS DE INCINERADORAS DE RSM

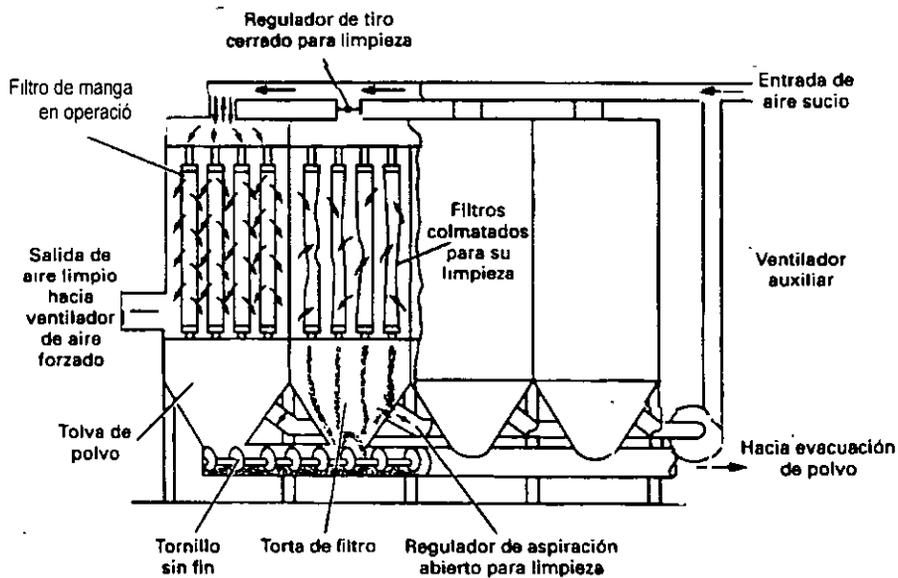


FIG. 22. FILTRO DE BOLSAS PARA LA SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS DE INCINERADORAS DE RSM

Los parámetros de diseño más importantes para un filtro de bolsas son el área, el material y el método de limpieza del filtro. En las aplicaciones de incineración de RSM se han utilizado con éxito diversos materiales como filtros de bolsas, éstos incluyen: de vidrio, tejido de vidrio y Teflón™. El rendimiento de los filtros de bolsas en las nuevas instalaciones ha sobrepasado las más estrictas líneas directrices estatales. Los filtros de bolsas instalados en 12 de 13 incineradoras de RSM, que fueron probados durante el periodo 1986-1987, lograron una tasa de emisión de partículas menor que los 0,01 granos/dscf requeridos por algunos estados, como California.

Filtro electrostático de grava. El filtro electrostático de grava es un dispositivo híbrido que emplea la filtración mecánica y la atracción electrostática. Esta tecnología se ha empleado en hornos que queman madera y, más recientemente, en la incineradora de RSM de Pittsfield, Massachusetts. Se ha constatado una tasa de emisión de partículas de 0.035 granos/dscf.

Equipamiento para el control de NO_x. El NO_x combustible, formado mediante reacciones entre oxígeno y nitrógeno orgánico en el combustible, y el NO_x térmico, formado mediante reacciones entre el nitrógeno y el oxígeno en el aire utilizado para la combustión, son las dos principales fuentes de NO_x en la incineración. La separación en origen de RSM para separar fuentes de nitrógeno orgánico, tales como comida y residuos de jardín, del flujo de residuos antes de la incineración podrían utilizarse para controlar el NO_x combustible.

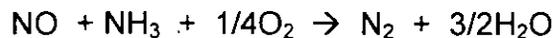
El control del NO_x térmico se puede conseguir mediante controles de combustión y el tratamiento de los gases de combustión. Los controles de combustión incluyen:

- Recirculación del gas de combustión
- Funcionamiento con bajas cantidades de aire en exceso e incineración por etapas.

En la recirculación de los gases de combustión una porción de los gases de escape de la incineradora se devuelve junto al aire de combustión del horno. El funcionamiento con bajas cantidades de aire en exceso y la incineración por etapas implican un cuidadoso control de la entrada de aire a la incineradora, mediante la división de aire de combustión en corrientes primarias y secundarias. Por lo tanto, parte del horno funciona con aire limitado o en gasificación y el resto del horno funciona con aire en exceso, reduciendo así la cantidad de NO_x térmico formado en el horno. Como los gasificadores se diseñan para operar de esta forma, tienen emisiones de NO_x intrínsecamente bajas.

Dos tecnologías utilizadas para tratar los gases de combustión incluyen la reducción catalítica selectiva (RCS) y la reducción no catalítica selectiva (RNCS).

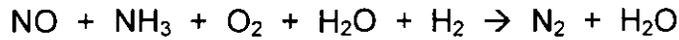
Reducción catalítica selectiva. La reducción catalítica selectiva emplea la inyección de amoníaco en los gases de chimenea, seguido por el paso del gas sobre un lecho catalizador. La reacción siguiente se produce en el intervalo de temperatura de 280 a 430°C:



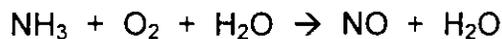
Se han empleado como catalizadores metales base como cobre, hierro, cromo, níquel, molibdeno, cobalto y vanadio, en diversas formas (granulares, cilíndricas, mallas). La tecnología es bastante eficaz, consiguiendo reducciones de hasta el 90 por 100 en aplicaciones en las que se queman carbón y aceite. El proceso todavía no se ha aplicado a la incineración de RSM por la sensibilidad de los catalizadores a la contaminación por partículas y al envenenamiento por plomo.

Reducción no catalítica selectiva. La reducción no catalítica selectiva ha sido desarrollada comercialmente por Exxon Research and Engineering Company, que licencia el proceso como Proceso Térmico DeNO_xTM. Funcionando en más de 60 instalaciones, el proceso se basa en la inyección de amoníaco, pero no hay ningún

catalizador implicado. El amoníaco se inyecta directamente al horno. Cuando se inyecta amoníaco en un horno en el rango de temperatura de 700 a 1,200°C, predomina la siguiente reacción aproximada:



Si no se añade H₂, el límite inferior de temperatura de la reacción dada en la ecuación anterior es 870°C. Con temperaturas por encima de 1,200°C predomina la reacción aproximada dada en la ecuación siguiente. El proceso debe controlarse muy cuidadosamente porque la producción extra de NO sería contraproducente.



El proceso es mecánicamente sencillo, como se puede ver en la Figura 23. El control de la temperatura del proceso se consigue instalando inyectores múltiples de pared en el horno, para que el NH₃, pueda inyectarse en una zona del horno dentro del rango de temperatura óptimo. Se han conseguido eficiencias de separación del 50 al 80 por 100.

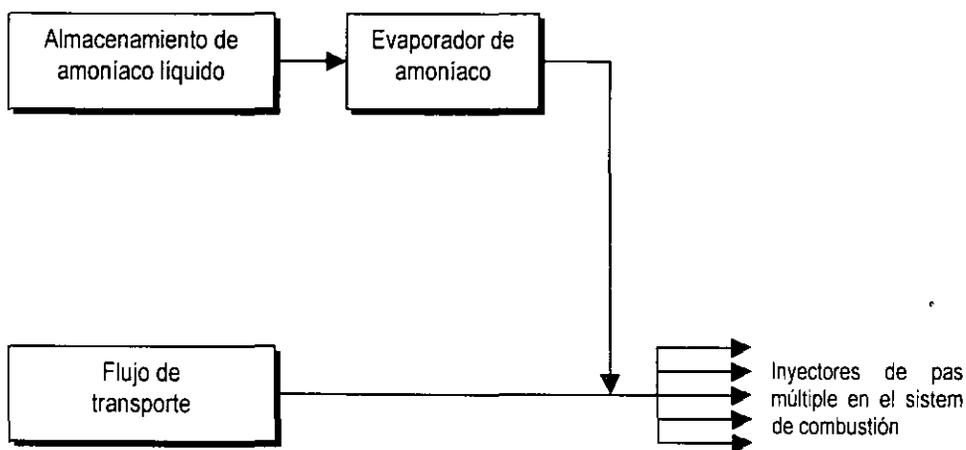


FIG. 23. ESQUEMA DEL PROCESO TÉRMICO DeNO_x™ PARA CONTROLAR LAS EMISIONES DE NO_x.

Equipamiento para controlar gases ácidos. Las emisiones incontroladas de la incineración de RSM pueden contener ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂). Los ácidos clorhídrico y fluorhídrico se emiten como aerosoles finos, y los dióxidos de nitrógeno y azufre se emiten en forma de gas que se combinan con las gotas de agua en la atmósfera para formar lloviznas de ácido nítrico y ácido sulfúrico. Estas lloviznas ácidas pueden producir una reducción en la visibilidad, la corrosión de metales y nieblas y lluvias ácidas. Existen varios métodos para controlar los gases ácidos, incluyendo:

- La separación en origen de los residuos que contienen cloro y azufre
- La depuración húmeda de los gases de combustión, en la que se utilizan disoluciones líquidas para depurar y neutralizar los gases ácidos
- Depuración seca, en la que se inyectan pastas húmedas neutralizantes directamente en la corriente de gas de combustión.

Separación en origen. Un método para controlar las emisiones de HCl y SO₂ es la separación en origen de los componentes de los residuos que contienen grandes cantidades de cloro y azufre, como pueden ser los plásticos. La separación de estos residuos tenderá a reducir el contenido energético de los residuos restantes. El contenido en cloro y azufre para diversos componentes de residuos se lista en la Tabla 8. La separación en origen de plásticos, residuos de jardín y diversos orgánicos parece ofrecer un gran potencial para la reducción de HCl, SO₂ y la porción de NO₂ combustible. Sin embargo, todavía no se ha demostrado la efectividad de este acercamiento.

Depuración húmeda. La depuración húmeda se ha utilizado ampliamente en Europa y Japón. Por ejemplo, en Kiel, Alemania, se utiliza la depuración húmeda con una solución de cal en un lavador venturi en una incineradora de RSM. Como se muestra en la Figura 24, el sistema es bastante complejo y está formado por un lavador venturi y un desvaporizador, un apagador de cal y un filtro prensa para

deshidratar los lodos de la depuradora antes de su evacuación. También forma parte del sistema un intercambiador de calor, que primero enfría los gases de combustión hasta 32°C antes de la depuradora y después recalienta los gases antes de ser evacuados por la chimenea. El paso de enfriamiento se requiere para incrementar la eficiencia de la operación de depuración, y el paso de recalentamiento se requiere para incrementar la fuerza ascendente de las emisiones. El rendimiento del sistema tiene una separación media de HCl del 89 al 98 por 100; de HF, del orden del 84 al 96 por 100, y una separación de SO₂, del 55 al 97 por 100.

TABLA 8
CONTENIDO DE AZUFRE Y CLORO DE LOS MATERIALES RESIDUALES ENCONTRADOS EN LOS RSM

Material	Contenido de azufre, porcentaje del peso seco	Contenido de cloro, porcentaje del peso seco
Cartón	0.05	0.05
Papel de periódico	0.03	0.05
Residuos de jardín	0.07	0.34
Goma, madera, textiles, etc.	0.18	0.14
Plástico	0.27	6.48
Papel mezclado	0.04	0.12
Orgánicos misceláneos	1.15	1.8

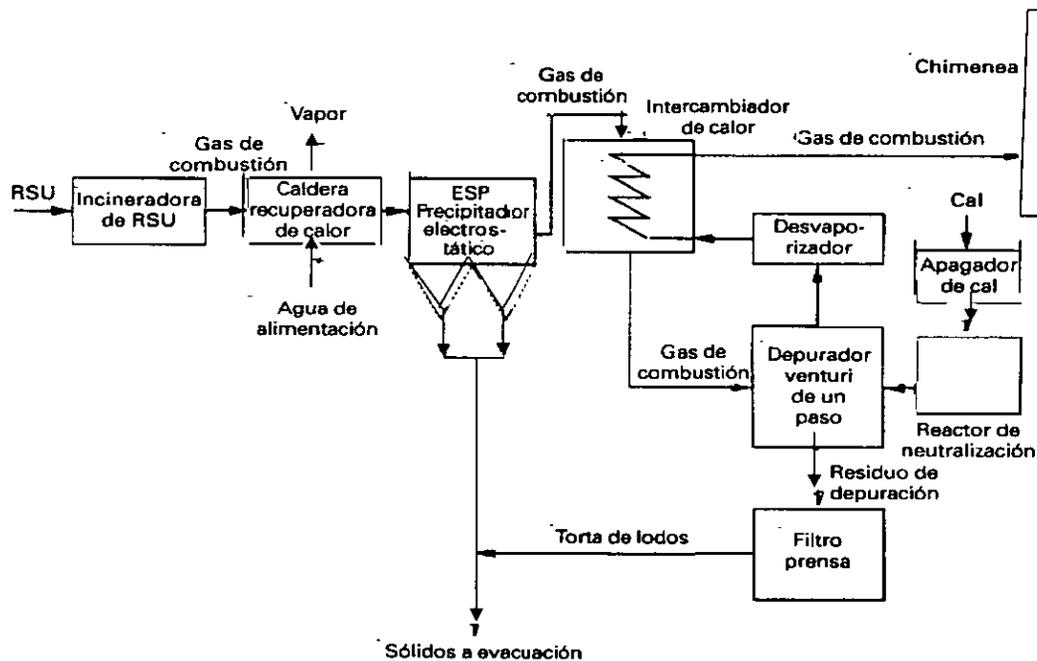


FIG. 24. DIAGRAMA DE FLUJO DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN HÚMEDA UTILIZADA CONJUNTAMENTE CON LA INCINERADORA DE RSM EN KIEL, ALEMANIA, PARA EL CONTROL DE GASES ÁCIDOS Y SO₂

Depuración seca. Los sistemas de depuración seca son otro método de tratamiento de gases ácidos. Se utilizan dos técnicas:

- Secado de rocío
- Inyección en seco

En la Figura 25 se muestra un sistema típico de secado de rocío. Se bombean disoluciones de carbonato de sodio y de cal en el desecador de rocío, donde reaccionan con los gases de combustión. Los gases ácidos y el SO_2 son adsorbidos sobre la superficie de las gotas, reaccionando para formar sales neutras tales como sulfato de calcio (CaSO_4), cloruro de calcio (CaCl_2), sulfato de sodio (Na_2SO_4) y cloruro de sodio (NaCl). Más adelante en el sistema se separan las partículas sólidas de sal, así como las cenizas volantes que aún están en los gases de combustión, mediante un filtro de bolsas. La eficiencia de separación del SO_2 para un combinado depuradora secador/filtro de bolsas es bastante alta, acercándose al 98 por 100.

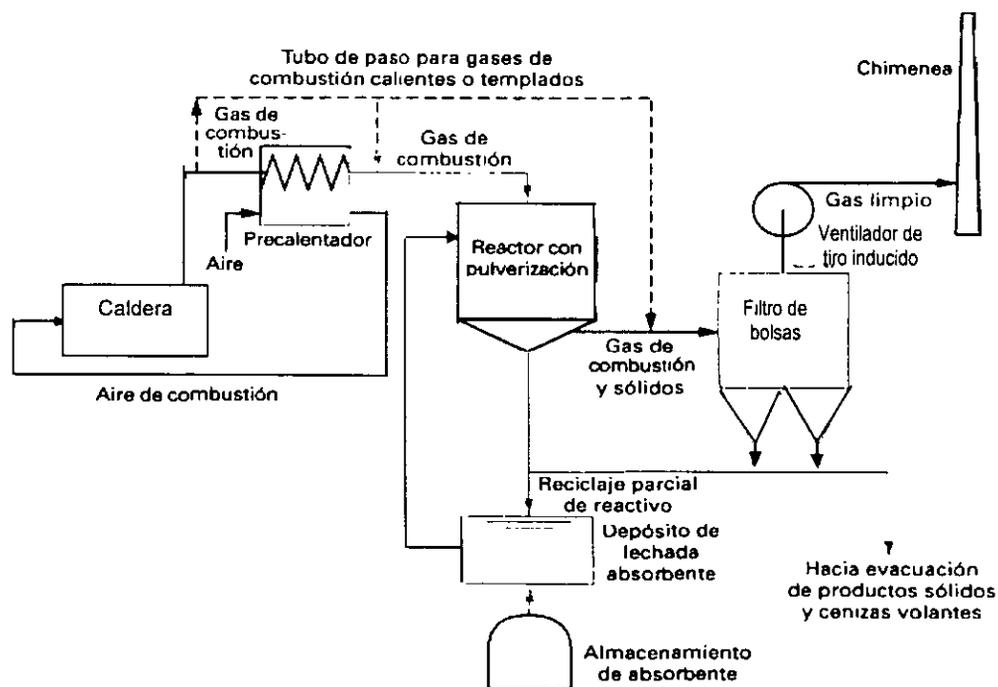


FIG. 25. DIAGRAMA DEL FLUJO DE UNA DESECADORA DE ROCÍO PARA LA SEPARACIÓN DE GASES ÁCIDOS Y SO_2 .

El otro sistema de depuración seca es la inyección en seco, como en el Teller Dry Scrubbing System™. Como se puede ver en la Figura 26, se rocía una solución de cal en la cámara de reacción, neutralizando los gases ácidos. El agua en la disolución se evapora completamente, de forma que no hay todos líquidos que tratar. Se añade un agente aglomerante patentado, Tesisorg™, a la corriente del gas de combustión después de la cámara de inmersión para ayudar a la coagulación de las partículas muy finas, antes de su recolección en el filtro de bolsas. Para el sistema Teller han sido constatadas eficiencias de separación para HCl y SO₂ de hasta el 99 por 100.

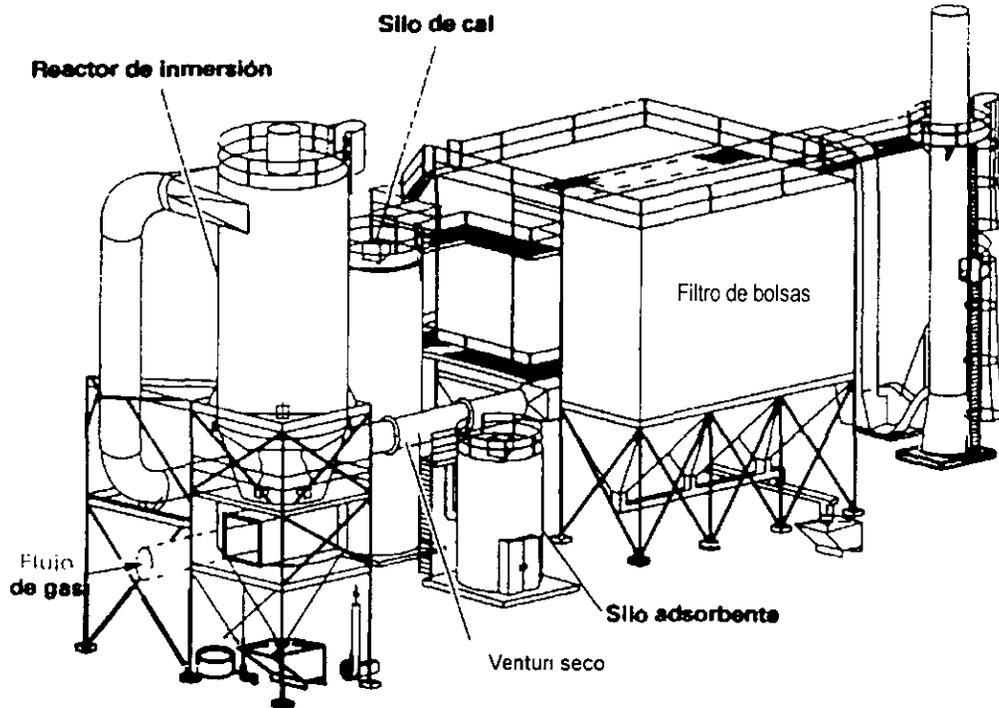


FIG. 26. SISTEMA DE DEPURADORA SECA TELLER PARA GASES ÁCIDOS Y SO₂. SE INYECTA TESISORB™, UN POLVO CRISTALINO CON UN RANGO DE TAMAÑO ESPECÍFICO, U OTRO AGENTE, Y SE MEZCLA EN EL VENTURI SECO ANTES DEL FILTRO DE BOLSAS.

Equipamiento para el control de CO y HC. El control del monóxido de carbono (CO) y de los hidrocarburos (HC) está directamente relacionado con la eficiencia de la incineración y está en función del diseño y de la operación del sistema. La formación de CO y HC se produce por la incineración incompleta de los residuos, debido a una incineración rica en combustible (sobrecarga del horno) y a la insuficiencia de temperatura provocada por el alto contenido en humedad de los residuos. El uso de oxígeno adicional es la primera herramienta para controlar la producción de CO y HC. El oxígeno adicional se debe equilibrar para evitar una combustión a temperatura demasiado alta y la generación de excesivas emisiones de NO_x. El equilibrio de estos factores en incineradoras modernas de RSM se lleva a cabo mediante la supervisión continua de las emisiones (SCE) de los constituyentes del gas de combustión (CO, CO₂, NO_x, HC y O₂). Las lecturas de CO y O₂ se utilizan para equilibrar el aire en exceso. También se utilizan las lecturas de temperatura en las partes cruciales del horno para ayudar en el control. Los sistemas sofisticados de presentación de datos informatizados y de instrumentación de control se utilizan para ayudar a los operadores a conseguir un funcionamiento eficiente.

En los sistemas de incineración en bruto, es crucial la habilidad del operador de la grúa para cargar la cámara de combustión con el fin de conseguir una combustión óptima, porque el operador de la grúa tiene que mezclar los residuos antes de la carga para minimizar las cantidades desiguales de combustible y debe mantener un flujo de combustible hacia la unidad de combustión tan uniforme como sea posible. Los sistemas que funcionan con CDR pueden estar más automatizados, por la calidad más uniforme del flujo de residuos. La calidad uniforme del combustible simplifica el papel del operador que alimenta de residuos al sistema.

Equipamiento para el control de dioxinas, furanos y metales. Algunos de los contaminantes no clasificados más importantes en la incineración de RSM incluyen dioxinas, furanos y metales. Existen varias tecnologías para facilitar su control, incluyendo la separación en origen, los controles de combustión y el

control de partículas. Como se argumentó anteriormente, la separación en origen puede ser una medida eficaz para limitar las emisiones de metales pesados producidas por la incineración de RSM. La separación en origen de pilas ya se usa en Japón y Suecia para controlar las emisiones de mercurio y cadmio.

El uso de la separación en origen para controlar las dioxinas y furanos es más problemática. Aunque se ha recomendado la separación de los residuos que contengan cloro, principalmente plásticos, como medida de control, la evidencia experimental hasta la fecha no ha probado que sea eficiente. En unas pruebas recientes en la incineradora de Pittsfield, Massachusetts, se hicieron unos ensayos con muestras <<tocada>> de RSM que contenían cantidades extras de policloruro de vinilo (PVC). Aunque se generaba más gas HCl, no se encontró una correlación entre PVC y HCl y las concentraciones de dioxinas y furanos.

Los controles de combustión son la estrategia de control principal para reducir las emisiones de dioxinas y furanos. Se ha constatado que existe una fuerte correlación entre la temperatura, el tiempo de residencia y las emisiones de dioxinas y furanos. La Junta de California de Recursos Atmosféricos recomienda temperaturas mínimas en los sistemas de procesamiento térmico de $980^{\circ}\text{C} \pm 105^{\circ}\text{C}$ ($1.800^{\circ}\text{F} \pm 190^{\circ}\text{F}$) con un tiempo de residencia mínimo de 1 segundo. También se ha constatado que las condiciones que minimizan la generación de CO minimizan también la generación de dioxinas y furanos. Por tanto, se puede usar el CO como un sustituto para supervisar las emisiones de dioxinas y furanos. La técnica de supervisión es significativa porque se puede medir el CO en tiempo real con sistemas de supervisión continuos. Actualmente no se pueden medir las dioxinas y furanos en una base continua.

También es importante el control de partículas para controlar las emisiones de metales y de dioxinas y furanos. Se ha comprobado que los óxidos y cloruros metálicos tenderán a condensarse sobre partículas submicrónicas de cenizas volantes a temperaturas por debajo de 260°C (500°F). El sistema más eficiente

para separar las partículas submicrónicas es el filtro de bolsas correctamente diseñado y, por lo tanto, es el método más eficiente y constante para controlar los metales. El mercurio, por su baja temperatura de volatilización, no se separa eficientemente con este mecanismo. La forma más eficiente de controlar el mercurio sigue siendo la separación en origen.

Existen evidencias de que las dioxinas y furanos pueden capturarse en la capa de polvo de los filtros de bolsas y en las depuradoras húmedas y secas utilizadas para controlar SO₂, si se mantienen las temperaturas por debajo de 140°C, permitiendo así la condensación de las dioxinas y furanos. Sin embargo, los resultados hasta la fecha no han sido suficientemente concluyentes para defender esta técnica como estrategia de control. Los controles de combustión siguen siendo la principal técnica para controlar las dioxinas y furanos.

Normativas de contaminación atmosférica

Bajo la autoridad del Acta del Aire Limpio, la Agencia para la Protección Ambiental (EPA) emitió Estandarizaciones de Rendimiento para las nuevas incineradoras de RSM y Líneas Directrices sobre Emisiones para incineradoras de RSM ya existentes en febrero de 1991. Con fines reglamentarios, las incineradoras de RSM (IRU) que comenzaron a construirse en o antes del 20 de diciembre de 1989 (la fecha en la que se publicaron las Normativas Preliminares en el Registro Federal para comentarios públicos) se consideran como IRU existentes.

IRU nuevas. Las Estandarizaciones de Rendimiento para las nuevas IRU se resumen en la Tabla 9. Actualmente las Estandarizaciones se aplican solamente a las IRU de capacidad superior a 250 t/d. Las Estandarizaciones se dividen en seis partes:

- Definición de buenas prácticas de combustión
- Límites de emisiones para orgánicos (dioxinas y furanos)
- Límites de emisiones para metales
- Límites de emisiones para gases ácidos

- Límites de emisiones para NO_x
- Requisitos de supervisión.

Las Estandarizaciones especifican también la mejor tecnología demostrada (MTD) para cumplir con los límites de emisiones.

TABLA 9
RESUMEN DE LAS NORMAS DE LA EPA PARA NUEVAS INCINERADORAS DE RSM

Aplicabilidad

Las New Source Performance Standardas (NSPS) (Normativas sobre el Rendimiento de Nuevas Fuentes) se aplican a las incineradoras de residuos urbanos (IRU) con capacidades unitarias por encima de 225 Mg/día (250 t/día) que queman desechos domésticos, comerciales y/o desechos institucionales. Las NSPS no cubren los desechos industriales

Buenas Prácticas de Combustión (BPC)

Nivel máximo de carga demostrado durante los ensayos de rendimiento de dioxinas/furanos.

No puede exceder el 110 por 100 de la carga máxima demostrada, media de 4 horas.

La temperatura máxima a la entrada del dispositivo de control de las partículas no puede exceder de 17°C por encima de la temperatura máxima demostrada durante los ensayos del rendimiento de dioxinas/furanos.

Nivel de CO (tiempo medio) de la forma siguiente:

IRU con aire restringido y en exceso	50 ppmv (4 horas)	
IRU con pantalla de agua y refractarios de quemado en bruto		100 ppmv (4 horas)
IRU utilizando combustión de lecho fluidizado		100 ppmv (4 horas)
IRU con pantalla de agua rotatoria de quemado en bruto Alimentadores de CDR		100 ppmv (24 horas)
IRU alimentadas por una mezcla carbón/CDR		150 ppmv (24 horas)

Certificación estatal o de la ASME para los supervisores de IRU. Formación de operario y manual de formación para el resto del personal de IRU.

Emisiones orgánicas de IRU (medidas en función del total de dioxinas/furanos)

Dioxinas/furanos	30 ng/m ³
Mejor Tecnología Demostrada (MTD)	Buenas prácticas de combustión (BPC) secador de rocío y filtro de tejido

Emisiones metálicas de IRU (medidas en función de MP)

Materia en partículas (MP)	34 mg/m ³ · N
Opacidad	10 por 100 (media de 6 minutos)
MTD	Secador de rocío y filtro de tejido

Emisiones de gases ácidos de IRU (medidas en función de SO₂ y HCl)

SO ₂	80 por 100 o 30 ppmv (24 horas)
HCl	Reducción del 95 por 100 o de 25 ppmv
MTD	Secador de rocío y filtro de tejido

Emisiones de óxidos de nitrógeno

NO _x	180 ppmv (24 horas diarias (bloque))
MTD	Reducción no catalítica selectiva

Requisitos de control

SO ₂	Sistema de supervisión continua de emisiones (SSCE), media Geométrica de 24 horas
NO _x	SSCE, media aritmética de 24 horas
Opacidad	SSCE, media de 6 minutos
CO, carga, temperatura	SSCE, media de 4 o 24 horas
MP, dioxinas/furanos y HCl	Ensayo anual de chimenea

IRU existentes. Las Líneas Directrices sobre Emisiones para las IRU existentes se resumen en la Tabla 10. Las Líneas Directrices contienen solamente cinco partes porque actualmente no se regulan las emisiones de NO_x. Sin embargo, las Enmiendas del Acta de Aire Limpio de 1990 permiten que EPA añada la regulación de NO_x a las IRU existentes en el futuro.

Las Líneas Directrices para IRU existentes son similares a las Estandarizaciones de Rendimiento para IRU nuevas, excepto que los límites de emisiones son menos estrictos. Por ejemplo, el límite de emisión para dioxinas y furanos en las IRU nuevas es 30 ng/dscm (nanogramos/metro cúbico estándar seco), mientras que el límite de emisiones para IRU existentes es 60 ng/dscm para IRU muy grandes (>1.100 t/d). La MTD también es diferente para las IRU existentes. Por ejemplo la MTD para controles de gases ácidos en una IRU muy grande existente es una desecadora de rocío y un precipitador electrostático, mientras que la MTD para una IRU nueva es una depuración seca y un filtro de bolsas.

Normativas estatales y locales. Los distritos de control para la contaminación atmosférica estatales y locales pueden emitir límites de emisiones que sean más estrictos que las normativas federales. Por ejemplo, las Líneas Directrices de California de 1991 para incineradoras de RSM, resumidas en la Tabla 11 son más estrictas que las regulaciones federales de 1991 en varios aspectos. Las publicaciones y congresos promocionados por las sociedades profesionales, tales como la Asociación para la Gestión del Aire y Residuos, también son una gran fuente de información actualizada.

Rechazos sólidos

Se producen varios tipos de rechazos sólidos en las instalaciones para la recuperación de recursos, incluyendo:

- Cenizas de fondo
- Cenizas volantes
- Productos de depuradora

TABLA 10
RESUMEN DE LAS DIRECTRICES SOBRE EMISIONES DE LA EPA PARA INCINERADORAS
EXISTENTES DE RESIDUOS URBANOS

Aplicabilidad

Las directrices se aplican a las IRU con capacidades por encima de 225 Mg/día (250 t/d), que incineran desechos domésticos, comerciales y/o institucionales. Los desechos industriales no se incluyen en las directrices. Las IRU con capacidades por encima de 250 t/d en plantas con una capacidad añadida >250 t/d pero ≤1,100 t/d (grande) y >1.100 t/d (muy grande) están sujetas a las siguientes disposiciones.

Buenas Prácticas de Combustión (BPC)

Nivel de carga máximo demostrado durante el ensayo de rendimiento dioxinas/furanos. No puede exceder el 110 por 100 de la carga máxima demostrada, media de cuatro horas.

La temperatura máxima en la entrada del dispositivo de control de la materia en partículas (MP) no puede exceder de 17°C por encima de la temperatura máxima demostrada durante los ensayos del rendimiento de dioxinas/furanos

Nivel de CO (tiempo medio) de la forma siguiente:

IRU con aire restringido y en exceso	20 ppmv (4 horas)
IRU con pantalla de agua y refractarios de quemado en bruto	100 ppmv (4 horas)
IRU utilizado combustión de lecho fluidizado	100 ppmv (4 horas)
IRU alimentadas por una mezcla carbón/CDR	150 ppmv (4 horas)
Alimentadores de CDR	200 ppmv (24 horas)
IRU con pantalla de agua rotatoria de quemado en bruto	250 ppmv (24 horas)

Certificación estatal o de la ASME para los supervisores de IRU. Formación de operario y manual de formación para el resto del personal de IRU.

Emisiones orgánicas de IRU (medidas en función del total de dioxinas/furanos)

Dioxinas/furanos	IRU muy grandes	60 ng/m ³ · N
	IRU grandes	125 ng/m ³ · N
Mejor Tecnología Demostrada (MTD)	IRU muy grandes	Buenas Prácticas de Combustión (BPC), secador de rocío y precipitador electrostático (ESP).
	IRU grandes	BPC, inyección de absorbente seco y ESP.

Emisiones metálicas de IRU (medida en función de MP)

Materia en partículas (MP)	IRU muy grandes	34 mg/m ³ · N
	IRU grandes	69 g/m ³ · N
Opacidad MTD	IRU muy grandes y grandes	10 por 100 (media de 6 minutos ESP)

Emisiones de gases ácidos de IRU (medidas en función de SO₂ y HCl)

SO ₂	IRU muy grandes	70 por 100 o 30 ppmv (24 horas)
	IRU grandes	50 por 100 o 30 ppmv (24 horas)
HCl	IRU muy grandes	Reducción del 90 por 100 o 25 ppmv
	IRU grandes	Reducción del 50 por 100 o 25 ppmv
SO ₂		Sistema de supervisión continua de emisiones (SSCE), media geométrica de 24 horas
Opacidad		SSCE, media de 6 minutos
CO, carga, temperatura		SSCE, media de 4 o 24 horas
MP dioxinas/furanos y HCl		Ensayo anual de chimenea

La gestión de estos rechazos sólidos es una parte esencial del diseño y de la operación de una instalación para la recuperación de recursos.

TABLA 11
DIRECTRICES DE CALIFORNIA EN 1991 PARA LA INCINERACIÓN DE RSM

Parte	Unidad	Valor
SO ₂	ppmv	30
NO _x (como NO ₂)	ppmv	30-50
CO	ppmv	50-100
THC (como CH ₄)	ppmv	1-10
HCl	ppmv	25
Total de partículas en suspensión	g/m ³ · N	0.023
Partículas (<2 μm)	g/m ³ · N	0.018

Cenizas de fondo. La porción no quemada y no quemable de los RSM se conoce como cenizas de fondo. En una instalación de quemado en bruto, las cenizas de fondo pueden contener cantidades considerables de metales y vidrio, así como orgánicos no quemados. Hay menos metal y vidrio en las cenizas de fondo procedentes de instalaciones que queman CDR, porque la mayor parte de estos materiales ya se han separado del flujo de residuos. La cantidad de materia orgánica no quemada en las cenizas es una medida del rendimiento de la instalación. Puede estimarse utilizando el Índice de Quemado de Cenizas (ABI).

$$ABI = \left(1 - \frac{(a-b)}{a} \right) \cdot 100\% \quad (13.11)$$

Donde:

a = Peso original de la muestra de cenizas.

b = Peso de la muestra de cenizas después de quemarlas en un horno de mufla.

Una incineradora de RSM bien operada debería ser capaz de lograr un Índice de Quemado de Cenizas del 95 al 99 por 100.

Las cenizas de fondo de la mayoría de las incineradoras de RSM en Estados Unidos se colocan en los vertederos, sin procesamiento. Se pueden recuperar los metales y otros materiales a partir de las cenizas de fondo mediante la separación magnética y el cribado. El problema es encontrar un mercado para los materiales. Por ejemplo, en Holanda es una práctica común utilizar las cenizas de fondo para el mantenimiento de diques. Las cenizas de fondo también se han utilizado con éxito para la construcción de capas base en las carreteras de Estados Unidos. Algunos investigadores han constatado éxitos con el uso de mezclas de cenizas de fondo, cenizas volantes, cal hidratada y cemento Portland para fabricar bloques de construcción convencional, se ha propuesto su utilización para arrecifes artificiales.

Cenizas volantes. A medida que se incrementa la eficiencia de los sistemas para controlar la contaminación atmosférica, se separan mayores cantidades de partículas, o cenizas volantes, de los gases de combustión. Eficiencias de separación de partículas que exceden del 99 por 100 son comunes con los sistemas modernos ESP y con filtros de bolsas. Las cenizas volantes resultantes son otro rechazo sólido que hay que gestionar.

Como las cenizas volantes están compuestas por partículas micrónicas y submicrónicas, que se han recogido con los sistemas para controlar la contaminación atmosférica, se deben manejar con mucho cuidado para evitar emisiones fugitivas de polvo que puedan ser dañinas para los trabajadores y el ambiente circundante. Las cenizas volantes deberían separarse de los dispositivos de recolección con transportadoras neumáticas y ser transportadas en contenedores cerrados hasta un lugar aceptable para su evacuación. Cuando las normativas locales lo permitan, las cenizas volantes también se pueden humedecer y mezclar con las cenizas de fondo antes de su evacuación.

Productos de depuradora. Los productos de la depuradora son los lodos producidos en una depuradora húmeda utilizada para la separación de SO_2 y

gases ácidos. Los productos de la depuradora son sales de sulfato de calcio y sodio formadas en la reacción de depuración como los orgánicos en cantidades traza y los metales pesados. La gestión de los productos de la depuradora incluye la deshidratación, para reducir el volumen, y la evacuación subsiguiente de los lodos en forma de rechazo sólido y del sobrenadante en forma de aguas residuales.

Metales pesados y orgánicos en cantidades traza. Es bien conocido que las cenizas de la incineración de RSM contienen cantidades traza de metales pesados y orgánicos. Por lo tanto, los rechazos sólidos deben gestionarse cuidadosamente para proteger al público del contacto con estos materiales. La inquietud principal se centra en el vertido de la ceniza, que bajo ciertas condiciones puede lixiviarse a las aguas subterráneas. Los elementos preocupantes incluyen: arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg), selenio (Se) y plata (Ag).

Se han utilizado diversos ensayos para valorar el potencial de lixiviado de las cenizas, incluyendo:

- El Ensayo EP de Toxicidad
- El Ensayo Procedimiento para las Características Tóxicas del Lixiviado (TLCP).

En el Ensayo EP de Toxicidad se lixivia una mezcla del 5 por 100 de cenizas y del 95 por 100 de RSM con una disolución ácida en una columna de ensayo. La intención del ensayo es simular la producción de lixiviados en un vertedero de residuos mezclados en el que están presentes ácidos orgánicos producidos por la descomposición biológica de orgánicos. En el ensayo TLCP, se trituran muestras de cenizas ≤ 9.5 mm mezcladas con una solución amortiguadora de acetato con un pH 5, mezclándolo durante 18 horas. Después se filtra el sobrenadante y se analizan los metales pesados. La validez de los ensayos es un asunto en

investigación y se están llevando a cabo diversos estudios para encontrar una correlación, si existe, entre los resultados de los ensayos y los lixiviados reales de cenizas en vertederos en explotación.

Procedimientos recomendados para la manipulación de cenizas. La buena práctica ingenieril para la gestión de las cenizas procedentes de la incineración de RSM se puede resumir de la forma siguiente:

- Manipulación: se deben humedecer correctamente las cenizas o cubrirlas para que no se produzcan emisiones fugitivas de polvo.
- Transporte: los contenedores de camiones deberán estar cubiertos y a prueba de fugas.
- Evacuación de cenizas volantes (solamente): la evacuación normalmente deberá ser en un monovertedero (sólo cenizas) equipado con recubrimientos dobles y un sistema para la recolección de los lixiviados.
- Combinado o solamente cenizas de fondo: la evacuación normalmente deberá ser en un monovertedero equipado con un recubrimiento mixto o de arcilla, o mediante la evacuación conjunta en un vertedero de RSM equipado con un doble aislamiento. Algunos diseñadores también incluyen instalaciones para la recuperación de gas para controlar la emisión de olores, causados por la descomposición de la materia orgánica parcialmente incinerada.

La política sobre evacuación de residuos sólidos es dinámica. Se deben consultar con EPA y las agencias locales y estatales apropiadas para las normas y guías actuales.

Descargas de aguas residuales

Las descargas de aguas residuales tienen diversos orígenes dentro de las plantas para la recuperación de recursos, incluyendo:

- Agua de limpieza y enfriamiento de los sistemas para la separación de cenizas húmedas
- Efluente de depuradoras húmedas procedente del equipamiento para la separación de ácidos y SO₂
- Aguas residuales de sellado y mantenimiento en general
- Aguas residuales de aguas de alimentación
- Purgas de la torre de enfriamiento.

Estas últimas dos fuentes están relacionadas con el sistema de generación de energía eléctrica y son comunes a cualquier estación térmica que utilice turbinas de vapor. Comparadas con el lixiviado que se produce en un vertedero, las cantidades de aguas residuales producidas son relativamente menores, pero pueden requerir algún pretratamiento antes de ser vertidas al sistema de alcantarillado municipal.

Aguas residuales de la separación de cenizas. Se pueden manipular tanto las cenizas húmedas como las secas. Los sistemas más comunes utilizan agua para templar y enfriar las cenizas antes de evacuarlas, y para controlar las emisiones fugitivas de polvo. Si las cenizas se evacúan fuera del lugar, el agua del templado se evacua con las cenizas y no se producen aguas residuales. El contenido en agua de las cenizas preocupa cuando finalmente se vierten las cenizas. En algunos sistemas se reciclan las cenizas de fondo para formar capas de base para carreteras. Las cenizas de fondo se pueden lavar para separar fácilmente los contaminantes disueltos, como cloruros y sulfatos.

Efluente de la depuración húmeda. La depuración húmeda es un método eficiente para el tratamiento del SO₂ y para la separación de gases ácidos. Sin embargo, se producen dos productos residuales: rechazo sólido (producto de la depuradora) y agua residual (efluente de la depuración húmeda). El tratamiento consiste en: neutralización, precipitación y sedimentación. En Bamberg, Alemania, la descarga del efluente de la depuradora excedió los valores límite alemanes para

el mercurio (0.05 mg/l). La precipitación con trimercaptotriacina ($C_3N_3S_5$) redujo los niveles de mercurio en el efluente hasta 0.045 mg/l. En Kiel, Alemania, está instalándose un tipo alternativo de depuradora húmeda en la incineradora de RSM. Los lodos de la depuradora serán deshidratados en un filtro de prensa y secados en evaporadoras multiefecto utilizando calor residual de la incineración de los RSM, eliminando así las aguas residuales del sistema.

Aguas residuales de sellado y mantenimiento general. Se generan pequeñas cantidades de aguas residuales por el agua utilizada para sellar y enfriar bombas y otros equipamientos. El agua de enfriamiento y sellado a veces se contamina con aceites y grasas. El agua de limpieza utilizada para lavar las zonas de descarga también es preocupante, porque contienen orgánicos de los RSM. Normalmente las aguas residuales se sedimentan antes de ser vertidas a las alcantarillas municipales.

Aguas residuales de aguas de alimentación. El agua utilizada para fabricar vapor en un sistema de turbina de vapor debe cumplir los requisitos más estrictos de calidad de agua para sólidos totales disueltos (SDT), pH y alcalinidad. Cumplir con estos requisitos requiere que los sistemas para el tratamiento de aguas de alimentación sean utilizados para las aguas de fuentes urbanas o de pozos in situ. Los sistemas típicos de tratamiento pueden emplear una combinación de unidades de ablandamiento de aguas, intercambio iónico, precipitación y ósmosis inversa. Las descargas de estos sistemas pueden regularse mediante normativas locales y estatales sobre descargas.

Purgas de torres de enfriamiento. Otra descarga de aguas relacionada con la producción de energía es la purga de torres de enfriamiento. Las torres de enfriamiento se utilizan para condensar el vapor en agua después de pasar el vapor por las turbinas de vapor. Esencialmente son intercambiadores de calor, en los que el vapor en el ciclo cerrado de vapor se enfría mediante una mezcla gota

de agua/aire en un circuito separado. El agua del circuito de enfriamiento se recircula sobre listones de madera u otro relleno dentro de la torre enfriadora.

Normalmente se utilizan sales de cromo para retrasar el crecimiento de algas dentro de la torre que reducen la eficiencia del enfriamiento. Mientras se recircula el agua de enfriamiento, está poco a poco se evapora, incrementando el contenido total de sólidos disueltos y de cromo. Periódicamente hay que cambiar el agua, produciéndose un efluente llamado purga. Como el agua tiene un alto contenido en sólidos disueltos y sales de cromo, puede requerir un pretratamiento mediante ósmosis inversa o precipitación antes de arrojarla a las alcantarillas municipales. Afortunadamente, los sistemas de generación de energía utilizados con incineradoras de RSM son relativamente pequeños, 10 a 50 MW, comparados con los 500 a 1,000 MW de una planta térmica típica, donde la purga de las torres enfriadoras es un problema importante.

7. SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Una vez que los residuos sólidos han sido convertidos en energía térmica en forma de vapor mediante la incineración, o en energía química en forma de gases o líquidos mediante la pirólisis o la gasificación, se pueden convertir en energía mecánica o eléctrica. El vapor puede utilizarse directamente en procesos industriales o para calefacción de edificios. El vapor puede usarse también para la producción de energía mecánica o eléctrica mediante una turbina de vapor. Los gases y líquidos producidos a partir de residuos sólidos mediante procesos biológicos y térmicos pueden emplearse para alimentar calderas de producción de vapor. Los gases y líquidos pueden utilizarse también para alimentar motores recíprocos y turbinas de gas. Los propósitos de esta parte son tres:

- Presentar los diagramas de flujo básicos disponibles para conseguir estas conversiones.

- Presentar los datos sobre eficiencia de los componentes utilizados en los diversos diagramas de flujo de procesos de conversión
- Ilustrar el uso de los datos en el cálculo de la eficiencia de producción de energía.

Diagramas de flujo sobre recuperación de energía

Los componentes principales utilizados para la recuperación de la energía son: calderas para la producción de vapor; turbinas de vapor; turbinas de gas y motores recíprocantes como motores primarios para la energía mecánica, y generadores eléctricos para la conversión de energía mecánica en electricidad. Las turbinas de vapor se utilizan en sistemas grandes de (10 a 50 MW) y las turbinas de gas y los motores recíprocos se utilizan en los sistemas más pequeños. En la Figura 27 se muestran diagramas de flujo para la recuperación de energía.

Sistemas con turbinas de vapor. El sistema más común de recuperación de energía para la producción de electricidad es el sistema con turbina de vapor. Como se puede observar en la Figura 27a, el vapor se produce en una caldera se quema RSM o CDR (también pueden utilizarse productos de conversión gaseosos o líquidos). El vapor se usa para mover una turbina de vapor y después se condensa de nuevo en agua de alimentación. La turbina de vapor alimenta un generador eléctrico, que suministra energía in situ y energía en exceso para exportar. El sistema es esencialmente una versión a escala más pequeña de una planta térmica alimentada por carbón, petróleo o gas.

Sistema de generador con turbina de gas. Las turbinas de gas requieren combustibles gaseosos o líquidos. Estos combustibles pueden suministrarse mediante procesos biológicos, gas de vertedero o digestión anaerobia de RSM, o mediante pirólisis o gasificación. Como se puede observar en la Figura 27b, una turbina de gas es similar a un motor a reacción, que consiste en un compresor para incrementar la densidad de la mezcla gas/aire, un combustor y una turbina para convertir los gases calientes de combustión en energía mecánica. El

generador eléctrico se conecta directamente al eje de salida de la turbina de gas. Las turbinas de gas son eficientes y compactas y se utilizan ampliamente en los sistemas de gas de vertedero.

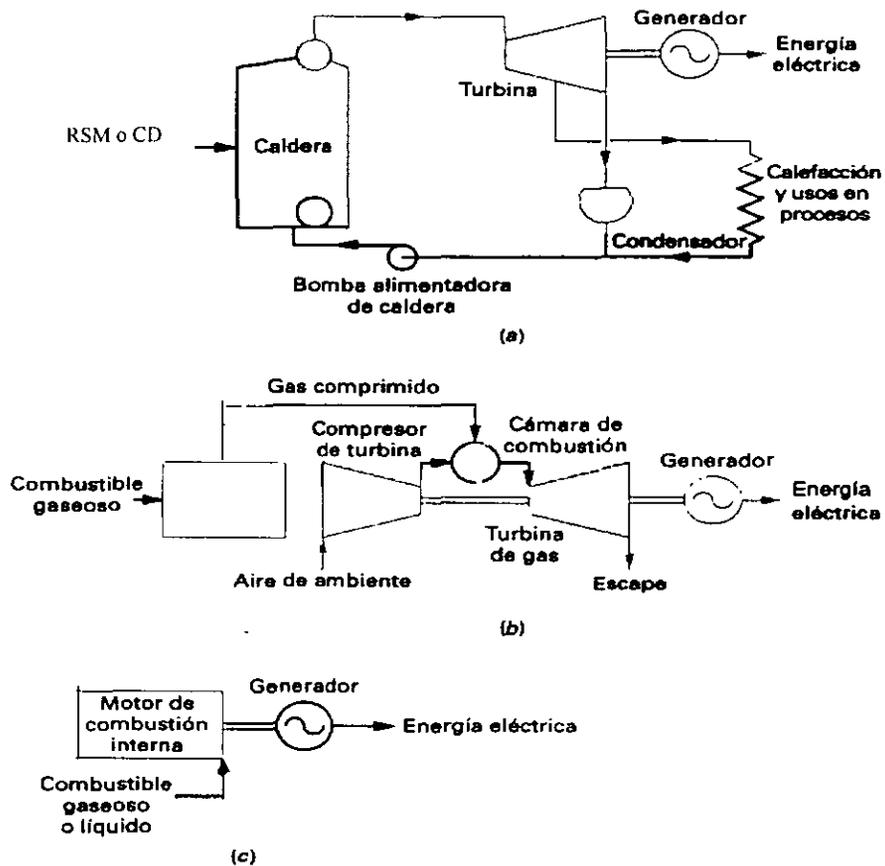


FIG. 27. DIAGRAMAS DE FLUJO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA. (a) UTILIZANDO TURBINA DE VAPOR, (b) UTILIZANDO TURBINA DE GAS Y (c) MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Sistemas con motor de combustión interna. Los motores de combustión interna que utilizan pistones y cigüeñal son una alternativa a las turbinas de gas para combustibles gaseosos y líquidos del procesamiento térmico o biológico de residuos sólidos (ver Figura 27c). Los motores son versiones modificadas de motores industriales diseñados para gas natural o propano. Como el gas natural

tiene un poder calorífico de unos 37,000 kJ/m³ comparado con los 16,000-18,000 kJ/m³ para el gas de vertedero y 6,000-12,000 kJ/m³ para el gas de poder calorífico, los motores utilizan carburadores y distribuidores de admisión modificados para manejar el gas de más baja calidad. Los motores de combustión interna son los generadores de energía más comunes utilizados en los sistemas para la recuperación del gas de vertedero.

Sistemas de cogeneración. Cogeneración se define como la generación simultánea útil de energía térmica y eléctrica. Los sistemas de cogeneración son utilizados ampliamente en la industria para generar electricidad y calor para procesos o de calefacción a la vez. Las aplicaciones para la recuperación de energía de residuos sólidos son limitadas por el requisito que hace necesario que el uso del calor recuperado se localice en el mismo lugar que el sistema de generación de energía. Existen varios diagramas posibles de flujo de cogeneración (ver Figura 28). En sistemas con turbina de vapor, el vapor para calefacción se genera mediante la extracción de parte del vapor desde las etapas de baja presión de la turbina de vapor (ver Figura 28a). En sistemas de turbina de gas, se puede añadir una caldera de calor residual para generar vapor desde la corriente de escape del gas caliente de la turbina (ver Figura 28b). En sistemas de motor de combustión interna, el calor se puede recuperar con radiadores especiales y envolturas de enfriamiento de escape (ver Figura 28c).

Tasas de calor de elaboración

En la producción de energía eléctrica la práctica común es considerar la eficiencia global de la conversión en términos de tasa de calor, como se expresa en la ecuación siguiente:

$$\text{Tasa de calor (kJ/KWh)} = \frac{\text{Calor suministrado en combustible}}{\text{Energía generada (KWh)}}$$

Cuando se utiliza esta ecuación, es importante recordar que el valor teórico para el equivalente mecánico del calor es igual a 3,600 kJ/KWh. Por tanto, si la eficiencia global del sistema es del 20 por 100, la tasa de calor sería igual a 18,000 kJ/KWh

[[3,600 kj/KWh)/0,20]. Los valores típicos de la tasa de calor para plantas térmicas se presentan en la Tabla 12. Con fines comparativos, los valores para los sistemas de recuperación de energía de residuos sólidos varían de 15,800 a 33,000 kj/KWh.

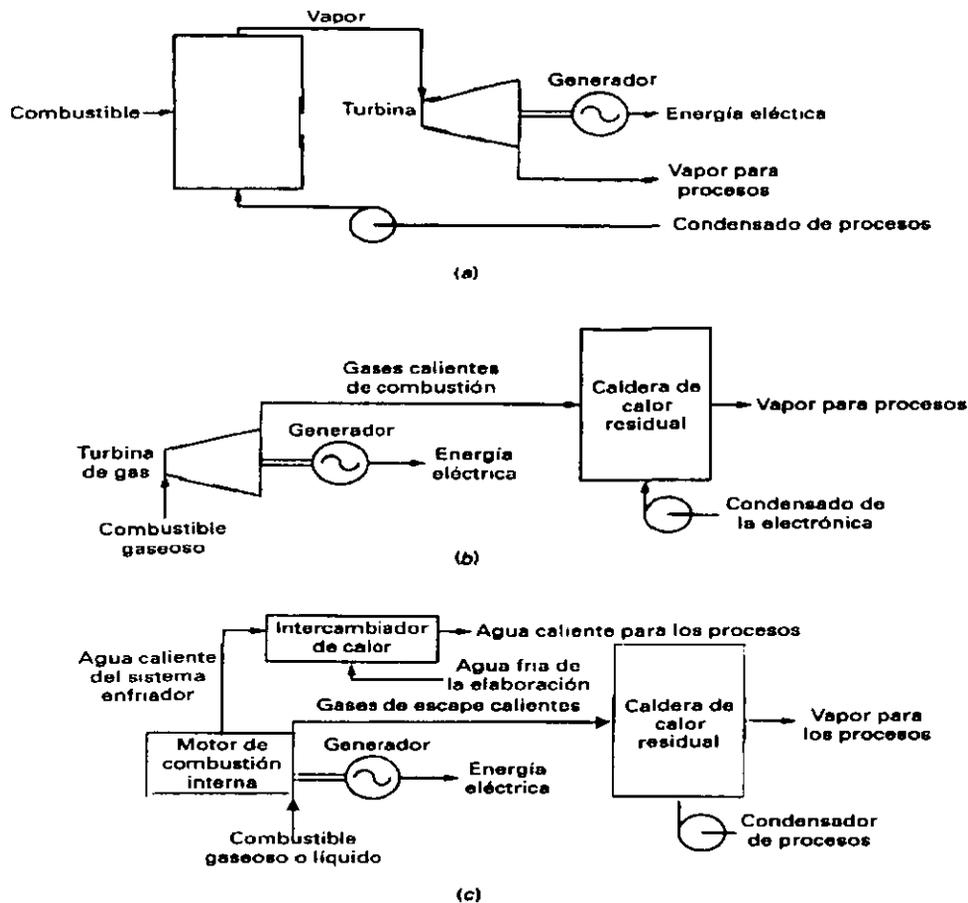


FIG. 28. DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA COGENERACIÓN DE ELECTRICIDAD, VAPOR Y/O AGUA CALIENTE; (a) UTILIZANDO UNA TURBINA DE VAPOR CON CALDERA CONTRAPRESIÓN, (b) UTILIZANDO UNA TURBINA DE GAS CON CALDERA DE CALOR RESIDUAL Y (c) UTILIZANDO UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON CALDERA DE CALOR RESIDUAL

Factores de eficiencia

Para valorar la eficiencia de la conversión en los diagramas de flujo dados en la Figura 27, se deben conocer los datos de eficiencia para los componentes individuales. En la Tabla 13 de esta sección se presentan y explican los datos representativos para calderas, gasificadores, turbinas de gas, combinados turbina de gas-generator, generadores eléctricos y para los usos de planta y los factores de pérdida relacionados.

TABLA 12
RENDIMIENTOS DE CALOR TÍPICOS PARA CENTROS TÉRMICOS REPRESENTATIVOS

Tipo de planta	Rendimiento de calor de planta Kcal/KWh	Eficacia térmica de la planta
Todas las plantas de vapor estacionarias, media	6,300	0.14
Plantas térmicas de vapor, media	2,898	0.30
Mejor planta térmica grande de vapor	2,142	0.40
Planta industrial pequeña de vapor no condensadora	8,820	0.10
Planta industrial pequeña de vapor condensadora	5,040	0.17
Planta térmica de vapor <<subproducto>>	1,134-1,260	0.70-0.75
Planta de diesel	2,898	0.30
Planta térmica de gas natural	3,528	0.24
Planta térmica de gasolina	4,032	0.21
Planta térmica de gas de bajo poder calorífico	0,536	0.19

Calderas. Se pueden construir calderas como una parte integral del sistema de procesamiento térmico, como en una cámara de combustión con pantalla de agua, o como un dispositivo separado, como puede ser una caldera, de calor residual. Es importante poder estimar la eficiencia de una caldera ya que normalmente es el primer componente de un sistema para la recuperación de energía. Las variables más importantes que afectan a la eficiencia de las calderas incluyen: el contenido energético de los residuos sólidos, el contenido en humedad, la temperatura de salida de los gases de combustión y el diseño físico de los tubos de agua en la caldera. Aunque estas variables son específicas del diseño de cada caldera, pueden utilizarse los datos presentados en la Figura 29 y en la Tabla 13 como guía para estimar la eficiencia. Las curvas presentadas en la Figura 29 se basan en los residuos sólidos celulósicos (por ejemplo, papel y cartón) con un 50 por 100 de aire en exceso utilizado en el proceso de combustión. Las eficiencias constatadas para calderas se supone que incluyen pérdidas de calor latente y radiación, calor sensible y pérdidas de carbono no quemado. Comparadas con calderas que queman combustibles convencionales, donde son frecuentes eficiencias de hasta el 85 por 100, las calderas de residuos sólidos normalmente están en el rango de eficiencia del 60 al 70 por 100. Esta menor eficiencia se debe

principalmente al alto contenido en humedad de los residuos sólidos comparándolo con los combustibles sólidos convencionales, tales como carbón y madera.

Gasificadores. En la Tabla 13 se presentan datos sobre la eficiencia térmica de los gasificadores. El gas crudo y caliente es apto para alimentar calderas, mientras que el gas limpio y frío es requerido para alimentar turbinas de gas o motores recíprocos. En el ejemplo 4 se muestran los cálculos del balance de energía para un sistema con motor gasificador.

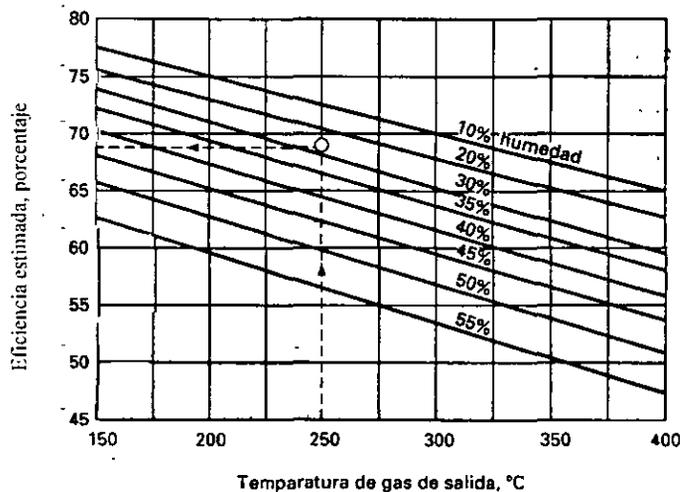


FIG. 29 EFICIENCIA ESTIMADA DE UNA CALDERA FRENTE A LA TEMPERATURA DEL GAS DE SALIDA PARA LA INCINERACIÓN DE RSM.

Ejemplo 4. Cálculo de la eficiencia y del rendimiento energético para un sistema de recuperación de energía utilizando una planta gasificador-motor-generador. Estimar la cantidad de energía producida a partir de un sistema de conversión energética de residuos sólidos con una capacidad de 50 t/d. El sistema consiste en una combinación de gasificador con lecho fluidizado-motor de combustión interna-generador eléctrico. Estimar también la tasa de calor y la eficiencia global del proceso.

TABLA 13
FACTORES TÍPICOS DE EFICIENCIA Y PÉRDIDA PARA SISTEMAS DE PROCESAMIENTO TÉRMICO

Componente	Eficiencia		Observaciones
	Rango	Típico	
Incineradora – caldera	40-68	63	Incineración en bruto.
Caldera			
Combustible sólido	65-72	70	Incineración en bruto.
Combustible sólido	60-75	72	RSM procesados.
Gas de bajo poder calorífico	60-80	75	Hay que modificar los quemadores.
Alimentada por aceite	65-85	80	Los aceites producidos a partir de RSM quizás tendrán que mezclarse para reducir la corrosividad.
Reactor de pirólisis			
Convencional	65-75	70	
Purox	70-80	75	
Gasificadores			
Gas caliente	70-80	75	Incluye el calor sensible del gas, cuando se utiliza el gas en una caldera.
Gas frío, filtrado	60-70	65	No incluye el calor sensible del gas, cuando se utiliza el gas en un motor o turbina de gas.
Proceso de metanización	80-90	85	Conversión del gas de bajo poder calorífico en calidad de gas natural
Turbinas			
Gas de combustión			
Ciclo sencillo	8-12	10	
Regenerativo	20-26	24	Incluye los accesorios necesarios
Gas de expansión	30-50	40	
Generador-turbina de vapor			
Menor que 12,5 MW	24-30	29	Incluye condensador, calentadores y todos los otros accesorios necesarios, pero no incluye caldera.
Mayor que 25 MW	28-32	31.6	
Generador eléctrico			
Menor que 10 MW	88-92	90	
Mayor que 10 MW	94-98	96	
Factores de utilización y pérdida en planta			
Concesiones de servicio de la central			
Generador-turbina de vapor	4-8	6	
Proceso Purox	18-24	21	
Proceso de metanización	18-22	20	
Pérdidas de calor inexplicadas	2-8	5	

Solución

1. Construir una tabla de cálculos para determinar el rendimiento energético, utilizando los datos de la Tabla 13 (ver la Tabla siguiente)

Parte	Valor
Energía bruta disponible en RSM, 10^6 Kcal/h (50 t/d) (1,000 kg/t) (28,116 Kcal/kg) (1/24 d/h)	5.86
Energía química disponible del gasificador, gas frío limpio, 10^6 Kcal/h $5.86 \cdot 10^6$ Kcal/h \cdot 0.7	4.10
Energía mecánica disponible del motor, 10^6 Kcal/h $4.10 \cdot 10^6$ Kcal/h \cdot 0.25	1,025
Generación neta de energía eléctrica KW $(1.025 \cdot 10^6$ Kcal/h) \cdot (0.90) / 860 Kcal/KWh	1,072

2. Determinar la tasa de calor para la planta propuesta utilizando la Ecuación correspondiente.

$$\text{Tasa de calor} = \frac{5,317.200 \text{ Kcal/h}}{976 \text{ KW}}$$

$$\text{Tasa de calor} = 5,448 \text{ Kcal/KWh}$$

3. Determinar la eficiencia global.

$$\text{Eficiencia} = \frac{(1,072 \text{ KW}) (860 \text{ Kcal/KWH})}{5.86 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h}}$$

$$\text{Eficiencia} = 15.7 \text{ por } 100$$

Comentario. Comparar la tasa de calor y la eficiencia de este sistema gasificador a pequeña escala (50 t/d) con el sistema a gran escala, con turbina de vapor (1,000 t/d, del Ejemplo 5. Aunque los valores son menores para el sistema gasificador, un sistema con turbina de vapor no sería rentable a esta escala. Se podría mejorar la eficiencia global utilizando un generador de energía más eficiente, tal como una turbina de gas de expansión (ver Tabla 13).

Turbina de gas. En la Tabla 13 se dan datos sobre la eficiencia térmica de diversas turbinas de gas. Los valores de eficiencia incluyen una concesión para los accesorios necesarios.

Sistemas de turbina de gas-generador. Los datos presentados en la Tabla 13 para el turbogenerador de vapor son consistentes con la práctica moderna y refleja todas las concesiones necesarias para condensadores, calefactores y otros accesorios. Utilizando el factor de eficiencia constatado del 31.6 por 100, el factor calorífico sería 10,800 Btu/KWh. Si se lograra una eficiencia de caldera del 75 por 100 la tasa de calor global sería 14,400 Btu/KWh. Esto es comparable con los valores presentados en la Tabla 12 para centrales térmicas de vapor.

Ejemplos. En la Tabla 14 se resumen los datos de dos incineradoras de RSM que utilizan actualmente turbinas de vapor-generadores. El sistema de Stanislaus County, California, es un sistema de combustión en bruto que emplea el sistema Martin de parrillas inversas-recíprocas. El sistema de Biddeford, Maine, es un sistema semifluidizado alimentado por CDR empleando calderas Babcock y Wilcox (ver Figura 30). Aunque los sistemas representan dos filosofías de diseño distintas, combustión en bruto frente a alimentación por CDR, las dos instalaciones tienen éxito en el cumplimiento de las normas de rendimiento y de los requisitos sobre emisiones de sus respectivas localidades.

Otros factores de uso y pérdida. En cualquier instalación en la que se produce energía, se deben hacer concesiones a las necesidades de la central o del proceso y a las pérdidas incontroladas del calor de proceso. Normalmente, la concesión de energía auxiliar varía del 4 al 8 por 100. Deben tenerse en cuenta ambos valores en la estimación de la tasa de calor neta cuando se utiliza la Ecuación correspondiente (última). En el ejemplo 5 se dan los cálculos de eficiencia para una turbina de vapor-generador típica.

Ejemplo 5. Cálculo del rendimiento energético y eficiencia para un sistema de recuperación de energía utilizando una planta de turbina de vapor-turbina-generador. Estimar la cantidad de energía producida por un sistema de conversión de energía de residuos sólidos con una capacidad de 1.000 t/d. El sistema consiste en una combinación de incineradora de RSM-caldera-turbina de vapor-generador eléctrico. Estimar también la tasa de calor y la eficiencia global del proceso, suponiendo que el consumo de servicio de la estación y las pérdidas de calor son del 6 y 5 por 100, respectivamente, de la energía total producida.

**TABLA 14 -
COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS DE INCINERACIÓN DE QUEMADO EN BRUTO
Y ALIMENTADO POR CDR**

Quemado en bruto-Condado de Stanislaus, California	
Capacidad	800 t/d
Parrilla	Martin inclinada, reciproca-reversible
Presión de vapor y temperatura	5,964 KN/m ² 443°C
Salida energética neta	20 MW (eléctrica)
Controles de contaminación atmosférica	NO _x : Exxon Thermal DeNO _x TM Systema Gases ácidos: depuración seca de gas de chimenea Partículas: filtro de bolsas
Propietario/Operador	Ogden Martin Systems, Inc.
Año de comienzo	1989
Alimentado por CDR – Biddeford, Maine	
Capacidad	600 t/d
Caldera	Babcock & Wilcox Waterwall
Salida energética neta	20 MW (eléctrica)
Controles de contaminación atmosférica	NO _x : no requerido Gases ácidos: depuración seca de gas de chimenea. Partículas: filtro de bolsas
Propietario/Operador	Maine Energy Recovery Company
Año de comienzo	1987

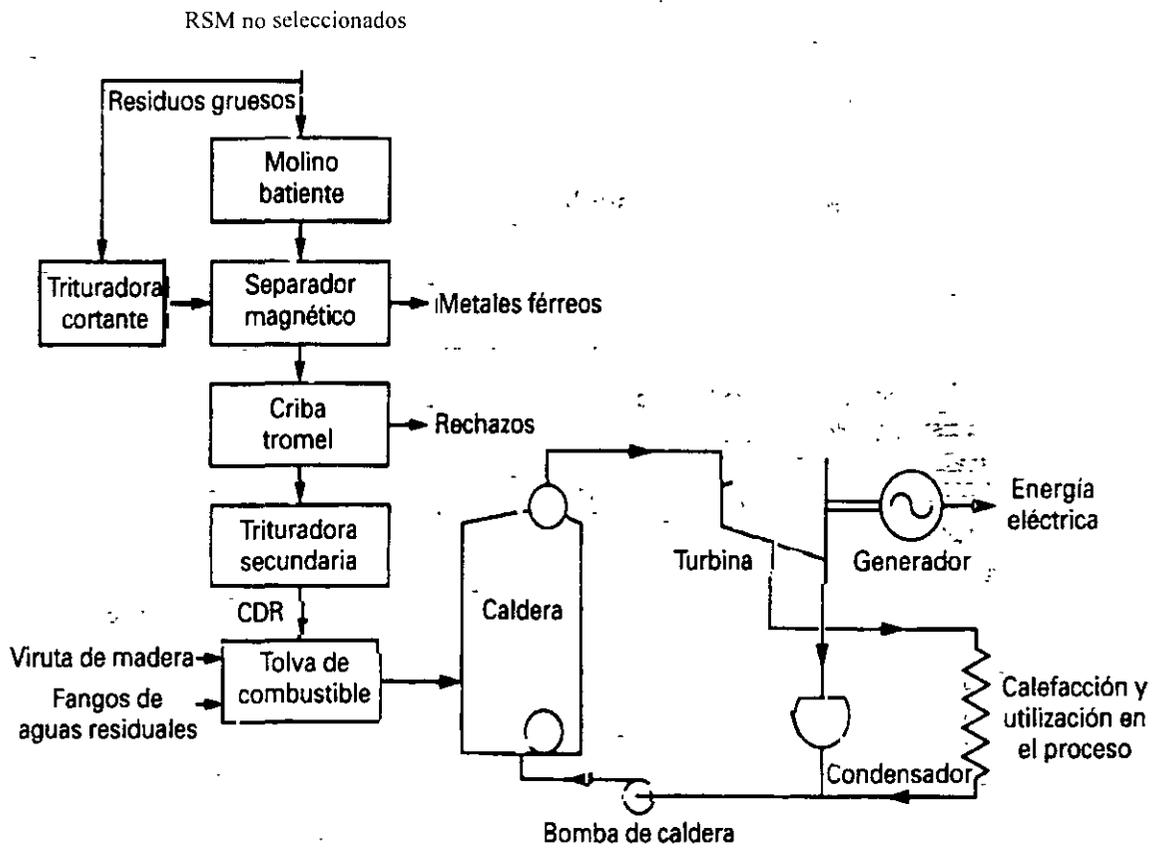


FIG. 30. DIAGRAMA DE FLUJO ESQUEMÁTICO PARA LA INCINERADORA DE CDR EN BIDDEFORD, MAINE.

Solución

1. Construir una tabla de cálculos para determinar el rendimiento energético, utilizando los datos de la Tabla 13.
2. Determinar la tasa de calor para la planta propuesta, utilizando la Ecuación correspondiente. (ver la Tabla siguiente)

$$\text{Tasa de calor} = \frac{117 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h}}{24,664 \text{ KW}}$$

$$\text{Tasa de calor} = 4,743 \text{ kcal/KWh}$$

Parte	Valor
Energía bruta disponible en RSM, 10 ⁶ Kcal/h [(1,000 kg/t) (1,000 kg/t) (2,816 Kcal/kg)] (24 h/d)	117
Energía de vapor disponible de la caldera 10 ⁶ Kcal/h (117 · 10 ⁶ Kcal/h) (0.7)	81.9
Energía mecánica disponible de la turbina de vapor, 10 ⁶ Kcal/h (81.9 · 10 ⁶ Kcal/h) (0.3)	24.6
Generación bruta de energía eléctrica KW (24.6 · 10 ⁶ Kcal/h) · (0.96) / (860 Kcal/KWh)	27,461
Consumo de servicio de la estación, KW (27,461) (0.06)	- 1,648
Pérdidas de calor, KW (27,461) (0.05)	- 1,373
Energía eléctrica neta disponible para su venta, KW	24,664

3. Determinar la eficiencia global.

$$\text{Eficiencia} = \frac{(24,664 \text{ KW}) (860 \text{ Kcal/KWh})}{(117 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h})}$$

$$\text{Eficiencia} = 18.12 \text{ por } 100$$

Comentario. Si se supone que el 10 por 100 de la energía generada se utiliza para el sistema de procesamiento primario (valores típicos que varían desde el 8 al 14 por 100), entonces la energía neta para su exportación sería 20,052 KW y la eficiencia global sería del 16 por 100.

