

# **LA INCINERADORA DE RESIDUOS: ¿ESTÁ JUSTIFICADO EL RECHAZO SOCIAL?**

ARTURO ROMERO SALVADOR \*

\* Departamento de Ingeniería Química, Universidad Complutense de Madrid. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde 22, 28004 Madrid.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La incineración es una técnica de tratamiento de residuos que permite reducir su volumen, su peso y modificar su composición debido al proceso de oxidación a elevada temperatura a que son sometidos. Debe considerarse que la incineración es una tecnología que puede formar parte de las tecnologías que configuran la gestión integral de residuos y no como una tecnología alternativa y excluyente. Al cumplir con la jerarquía de procedimientos de actuación en la gestión de residuos que ha establecido la Unión Europea, la incineración puede aplicarse a todo o a parte de la fracción de rechazo procedente del reciclado y a aquellos residuos que necesitan reducir su peligrosidad antes de efectuar su vertido.

La fracción orgánica del material reacciona con el oxígeno del aire y se transforma en dióxido de carbono y agua que pasan a formar parte de la corriente gaseosa, formándose un residuo sólido cuya masa y volumen es muy inferior y su composición muy diferente a la que tenía el original. Además, si se aprovecha su poder calorífico, las reacciones de oxidación son muy exotérmicas, se obtiene energía térmica y/o eléctrica, lo que significa una forma de valorizar, valorización energética, un residuo cuyo destino es su deposición en un vertedero.

En la corriente de gases formada como consecuencia de la combustión aparecen compuestos contaminantes debido a los arrastres de sólidos, a oxidaciones incompletas y a productos formados por reacciones del oxígeno con compuestos no hidrocar-

bonados. Todas estas sustancias deben reducirse a unos niveles de concentración suficientemente bajos para que las emisiones gaseosas cumplan la legislación que le es aplicable y que cada vez impone mayores limitaciones. El control de la contaminación de estas corrientes obliga a emplear técnicas de depuración complejas, que generan también residuos, pudiendo aparecer corrientes líquidas que se suman a los problemas que plantean los sólidos y los gases.

Independientemente de las mejoras ambientales que se han ido incorporando en las últimas décadas, se sigue considerando a la incineración como una práctica de gestión de residuos poco respetuosa con el ambiente y competidora con la prevención y el reciclado. ¿Está justificado este rechazo social?

## **2. EL PROCESO DE INCINERACION**

La combustión es una reacción química de oxidación entre un combustible y un comburente, caracterizada por su gran exotermicidad y por las elevadas temperaturas a que se produce. El comportamiento cinético de la combustión de los residuos sólidos depende de su heterogeneidad y de la evolución de la temperatura. No existe una partícula real o hipotética que pueda representar al residuo que se incinera, excepto en ciertos tipos de residuos industriales. Por ello, hay que considerar que los sólidos que se alimentan al horno están formados por una mezcla de partículas que difieren entre ellas en composición, en densidad, en tamaño, en forma y en estructura.

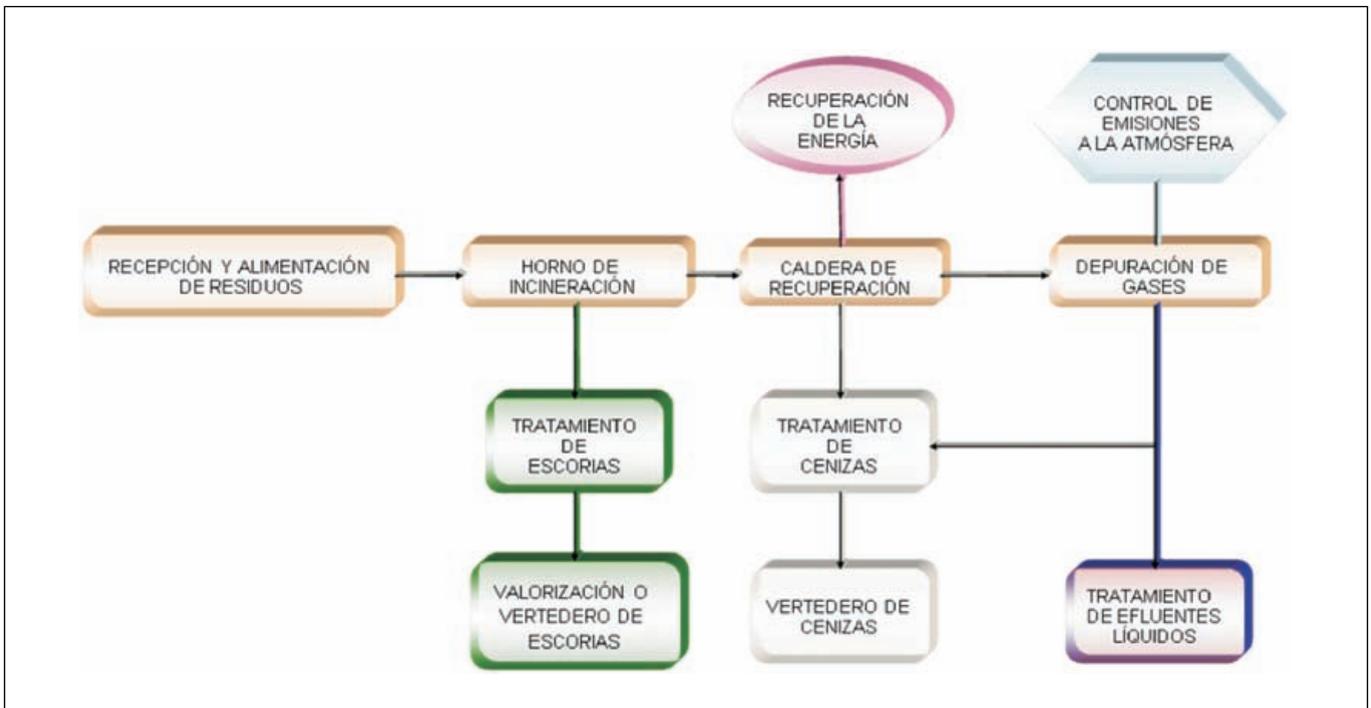
Existen instalaciones que utilizan los residuos como combustible habitual o complementario y que logran su eliminación como consecuencia del tratamiento térmico, pero su finalidad principal es la generación de energía o la fabricación de productos materiales. Por esta razón se denominan instalaciones de coincineración y la legislación que las regula tiene en cuenta que sólo una parte del combustible está formada por residuos.

Bajo la denominación de instalación de incineración se incluyen los diferentes equipos que se destinan al tratamiento térmico de los residuos, independientemente de que se recupere o no el calor producido por la combustión. Además del equipo necesario para la combustión, pueden efectuarse tratamientos previos —pirólisis, gasificación, proceso de plasma, etc.— para transformar los residuos en otras sustancias. Cuando el destino de estos productos es la combustión, los equipos en los que se realizan estas operaciones se incluyen como una parte más de esta tecnología.

El diagrama de bloques de una instalación de incineración con los principales elementos que la constituyen se representa en la figura 1.

En los distintos bloques de la figura se muestra la separación de los residuos que se van formando como consecuencia de las transformaciones que se producen en el proceso: escorias en el horno, partículas en la caldera, cenizas volantes, reactivos sin transformar y productos de la depuración de gases en los filtros, lodos procedentes del tratamiento húmedo de gases, etc. La corriente gaseosa, una vez depurada, sale de la instalación por la chimenea en la que se realizan las medidas que permiten conocer la concentración de los contaminantes que se emiten a la atmósfera y garantizar el correcto funcionamiento ambiental del proceso. Los principales contaminantes (medidos en concentraciones de mg/Nm<sup>3</sup>) son las partículas, monóxido de carbono, hidrocarburos inquemados, óxidos de azufre, metales pesados, compuestos de cloro y de flúor; pero las dioxinas y furanos (medidos en concentraciones de ng/Nm<sup>3</sup>, concentración un millón de veces más pequeña que el resto de los contaminantes) son los que se identifican como los más representativos y peligrosos de los contaminantes emitidos por las incineradoras.

Los sistemas de incineración se diseñan para que pueda recuperarse el calor generado durante el proceso y para que los residuos producidos se reciclen o, si no



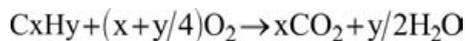
**Figura 1.** Diagrama de bloques de una instalación de incineración.

es posible, se reduzca al mínimo su cantidad y su nocividad.

## 2.1. Recepción y alimentación de residuos

Para determinar si un residuo es adecuado para tratarlo en una instalación de incineración debe cumplir una serie de características. Las más significativas son las siguientes:

- Contenido de materia hidrocarbonada. La reducción de volumen y de masa que experimenta un residuo en el proceso de incineración está directamente relacionado con el contenido de materia hidrocarbonada. Como consecuencia de la reacción de combustión el carbono y el hidrógeno se transforman en dióxido de carbono y agua:



- Poder calorífico. El poder calorífico del residuo aporta la información que permite calcular la energía que puede obtenerse al aplicar la incineración como método para tratar los residuos y es el calor de combustión por unidad de masa de combustible. Se denomina poder calorífico inferior (PCI) cuando en el proceso de combustión se considera que el agua formada está en fase

vapor. Es el parámetro que determina la energía que puede obtenerse por unidad de masa de residuos y el aumento de temperatura que tiene lugar en la combustión. En la tabla 1 se muestran valores del poder calorífico inferior de algunos residuos forestales, combustibles, bio-combustibles, componentes de los residuos sólidos urbanos (RSU) y otros residuos sólidos.

Para que la combustión sea autosostenida, es decir, que el proceso de incineración no requiera combustible adicional para transformar la materia hidrocarbonada en dióxido de carbono y agua, es preciso que el poder calorífico inferior del residuo supere un valor límite.

Con estos requerimientos se puede aplicar la incineración tanto a residuos urbanos como a residuos industriales, lodos de depuradora, residuos hospitalarios o residuos agrícolas y forestales. Además de procesar materiales sólidos, puede aplicarse a compuestos gaseosos, líquidos y pastosos, o a sus mezclas. En todos ellos se encuentran residuos o fracciones de residuos con elevado contenido de materia orgánica y suficiente poder calorífico.

La cantidad y composición de los residuos a tratar son factores fundamentales para fijar el objetivo prioritario y los problemas ambientales que pueden presentarse en el proceso de incineración. Así, los residuos de origen agrícola y forestal, los residuos proce-

| RESIDUOS Y COMBUSTIBLES   | PCI MJ/kg | COMPONENTES DE LOS R.S.U.  | PCI MJ/kg   |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-------------|
| Astilla de pino (40% HUM) | 11        | Poliestireno y polietileno | 46          |
| Serrines y virutas (35%)  | 12        | Policloruro de vinilo      | 19          |
| Cortezas (40%)            | 13        | Cuero                      | 19          |
| Poda de frutales (20)     | 14        | Papel                      | 17          |
| Cáscara de almendra (2)   | 18        | Madera                     | 16          |
| Hulla (2)                 | 29        | Grasas                     | 8           |
| Lignito                   | 20        | <b>R.S.U.</b>              | <b>8-16</b> |

**Tabla 1.** Poder calorífico inferior de diferentes residuos y combustibles.

dentes de la industria de elaboración de alimentos o los residuos que no han tenido tratamientos con compuestos organoclorados o metales pesados, permiten obtener energía por combustión sin que se necesiten medidas especiales por el mero hecho de tratarse de un residuo. La incineración de la fracción citotóxica de los residuos hospitalarios permite eliminar el riesgo que esta característica presenta para la salud. La elevada cantidad de residuos urbanos generados diariamente, el poder calorífico, el contenido de materia orgánica y las concentraciones de cloro y de metales pesados, son factores que permiten establecer la recuperación de energía y la reducción de volumen como objetivos y esperar problemas ambientales derivados del tratamiento por incineración.

Los residuos se deben almacenar en un recinto de la instalación que disponga de la capacidad necesaria para una operación continua. Como el residuo puede evolucionar desde su recepción hasta su incineración liberando sustancias potencialmente perjudiciales para la salud o el ambiente, la forma de almacenamiento está condicionada por el tipo de residuo y cantidad a tratar. En el caso de los residuos urbanos la recepción y almacenamiento se realiza en un foso en el que descargan los camiones de recogida. Desde este foso, los residuos a incinerar se alimentan al horno mediante un sistema mecánico adaptado a su estado físico y grado de agregación.

## 2.2. Hornos de incineración

Al poner en contacto un combustible sólido con aire en las condiciones apropiadas para que tenga lugar la reacción de oxidación, se produce un gran número de fenómenos o de etapas por las que transcurre el proceso. Estos fenómenos se producen simultáneamente en una secuencia serie-paralelo.

El agua puede encontrarse ocluida en la matriz sólida, adsorbida sobre la superficie, o formando parte del propio material. El secado y la deshidratación son los fenómenos responsables de su eliminación y suelen finalizar cuando se alcanzan los 350° C en todos los puntos de los residuos.

Cuando el material orgánico del residuo sólido alcanza temperaturas suficientemente elevadas se pro-

duce su descomposición, formando productos gaseosos y residuos de naturaleza carbonada. En la incineración se alcanzan valores de temperatura capaces de hacer que la pirólisis sea un proceso significativo cuando, en algún momento o en algún lugar del horno, la concentración de oxígeno sea pequeña. También la gasificación da lugar a productos gaseosos, diferentes del CO<sub>2</sub> y de los formados en la pirólisis, a partir de sólidos hidrocarbonados por acción de reactivos —oxígeno, vapor de agua— presentes en los gases que circulan en el horno. La licuefacción, dada la naturaleza oxidante de la fase gaseosa, tiene poca importancia. Estos fenómenos que producen la descomposición de la materia orgánica ocurren entre 350°C y 900°C.

Como resultado de los fenómenos anteriores, el combustible se encuentra formando parte de los sólidos y de la corriente de gases. La combustión es un proceso muy exotérmico y si se produce en un sólido, aumenta su temperatura al no eliminarse el calor a la misma velocidad con que se genera. El aumento de temperatura puede ser tan elevado que la combustión del sólido esté controlada por el aporte de oxígeno. La oxidación del combustible presente en el gas puede aproximarse a un proceso homogéneo, siempre que la circulación del fluido, turbulencia, permita que se encuentre en contacto con una concentración uniforme de oxígeno.

Debido a la presencia de otros elementos químicos que junto con la materia hidrocarbonada forman parte de los residuos, se producen también otras reacciones de oxidación que dan lugar a la formación de contaminantes. Entre los 300 y 600°C se produce la oxidación de los sulfuros y a partir de 900°C comienza la formación de óxidos de nitrógeno por reacción del nitrógeno atmosférico con el oxígeno. En algunos hornos se introducen reactivos para retener “in situ” ciertos contaminantes por lo que también se descomponen al alcanzar ciertos valores de temperatura, como ocurre con los carbonatos a partir de 600°C.

Las cenizas y escorias formadas a partir de los residuos pueden sufrir un conjunto de transformaciones, unas de carácter físico y otras de naturaleza química, debido a las altas temperaturas que pueden alcanzar. La composición de las escorias, la temperatura del lugar donde se encuentran y el tiempo que permanecen en el horno, son tres factores que determinan su evolu-

ción. Aquellos productos cuya presión de vapor es elevada, a la temperatura de operación, se transfieren de la fase sólida a la fase gas. La volatilización de los metales se produce a partir de 1000°C. La sinterización entre 750 y 1000°C y la fusión de las escorias por encima de 900°C

En la incineración de residuos se debe establecer el contacto del material alimentado con el aire en unas condiciones de temperatura que permitan transformar los compuestos hidrocarbonados en dióxido de carbono y agua, generando el calor de combustión. La incineración de gases es un problema sencillo porque combustible y comburente forman una sola fase. Basta con utilizar un equipo que logre una mezcla eficiente de aire y residuo en el menor tiempo posible. Cuando los residuos son líquidos, es preciso poner en contacto dos fases. El equipo en el que se produce su combustión debe lograr un área de contacto grande y una velocidad de transferencia elevada. Los denominados atomizadores permiten que el líquido se disperse en finas gotas en el aire de combustión. Cuanto menor sea el tamaño de las gotas, menor será el tiempo necesario para lograr su combustión. El problema a resolver es mucho más complejo cuando se trata de residuos sólidos porque al no poderse bombear, además de ser una mezcla heterogénea, no puede pulverizarse para lograr su dispersión en el aire.

Una instalación industrial destinada a la incineración de residuos sólidos debe ser capaz de lograr los siguientes objetivos:

- Buen contacto entre el sólido y el aire para que pueda alcanzarse la temperatura de combustión y la transformación de los reactantes en los productos de reacción. Las velocidades de transferencia de materia y de transmisión de calor se efectúan a velocidad elevada cuando se opera con velocidades relativas del aire con respecto del sólido, altas.
- Distribución de tiempos de residencia apropiada para conseguir la transformación completa de los reactivos. Todos los sólidos deben estar en el horno un tiempo mayor o igual que el necesario para la conversión completa. Este tiempo depende de las variables del modelo cinético gas-sólido que describa el proceso. Cuando se logran rendimientos elevados se evita que sal-

gan del horno compuestos inquemados tanto con la fase gas como con la fase sólida. De esta manera se consigue, además de aumentar el rendimiento energético del proceso, disminuir la emisión de contaminantes en el propio lugar donde se generan, con las ventajas que significa a la hora de depurar la corriente de gases a evacuar.

- Eliminación de cenizas y escorias para evitar que la fracción no combustible se acumule en el interior del horno. Es preciso extraerlas continuamente, si es continuo, o antes de cada operación, si es por cargas. Cuando el horno contiene un material inerte, como arena, al eliminar la ceniza se elimina también una parte del inerte y una fracción de la alimentación que no ha estado suficiente tiempo para quemarse completamente.
- La distribución de temperaturas en el horno debe permitir que el sólido alimentado vaya alcanzando los sucesivos valores que se requieren para que transcurran los distintos procesos que experimentan los residuos en su combustión. Pero, además de los fenómenos deseados, se pueden producir otros que causan problemas de operación.

El máximo aumento de temperatura que puede alcanzarse en el horno depende del poder calorífico del residuo y de la relación aire/combustible que se alimenta. Para un determinado valor de poder calorífico, la estequiometría de la combustión permite seleccionar el exceso de oxígeno para asegurar la combustión completa y evitar que la temperatura de combustión, conocida como combustión fría, sea baja.

Dadas las dificultades que presenta el control del movimiento de los sólidos en el horno, la heterogeneidad de la alimentación y el campo de temperaturas que se establece, es necesario operar de modo que no se produzca una evolución desfavorable de las escorias en su interior y evitar la abrasión de los materiales refractarios del horno.

Los principales tipos de hornos que permiten dar una respuesta a estos requisitos del proceso de incineración son los siguientes:

Hornos de parrilla, fijas, móviles, longitudinales, transversales, rodillos, etc.

Lechos fluidizados burbujeantes.

Lechos fluidizados circulantes.

Cilindros rotatorios.

Cada uno de estos equipos ofrece ventajas e inconvenientes cuyo balance depende de la situación concreta —tipo de residuo a tratar, el tamaño de la instalación, la legislación aplicable, etc.— que se analiza.

Los principales factores que se utilizan para conocer el comportamiento de los hornos son:

- Calidad de la incineración: fracción de compuestos inquemados en los gases y en las escorias y cenizas de hogar (en estos sólidos, el contenido en carbono orgánico total debe ser inferior al 3%).
- Adaptación a las características cambiantes del residuo: poder calorífico, humedad, contenido en cenizas.
- Facilidad de operación: elementos móviles, puesta en marcha y parada, paredes del horno.
- Prevención y retención en origen de contaminantes: óxidos de nitrógeno, introducción de reactivos.
- Consumo energético: necesidades energéticas para su funcionamiento.
- Contaminantes en la corriente de gases de escape: técnicas de depuración, sistema de recuperación de energía.

Con el fin de asegurar que la combustión de los gases formados en el horno de incineración sea lo más completa posible, es necesario que su temperatura alcance, después de la última inyección de aire de combustión, como mínimo y en las condiciones más desfavorables, los 850°C (1.100°C si se incineran residuos peligrosos que contengan más del 1% de sustancias organohalogenadas) durante un tiempo no inferior a 2 segundos. Otra medida que pretende lograr una combustión completa es la limitación de la concentración de monóxido de carbono en periodos temporales cortos (10-30 minutos) y así evitar un comportamiento fluctuante. La necesidad de conseguir en todos los hor-



**Figura 2.** Horno de incineración de lecho fluidizado (equipo de color marrón) de la incineradora de Valdemingómez.

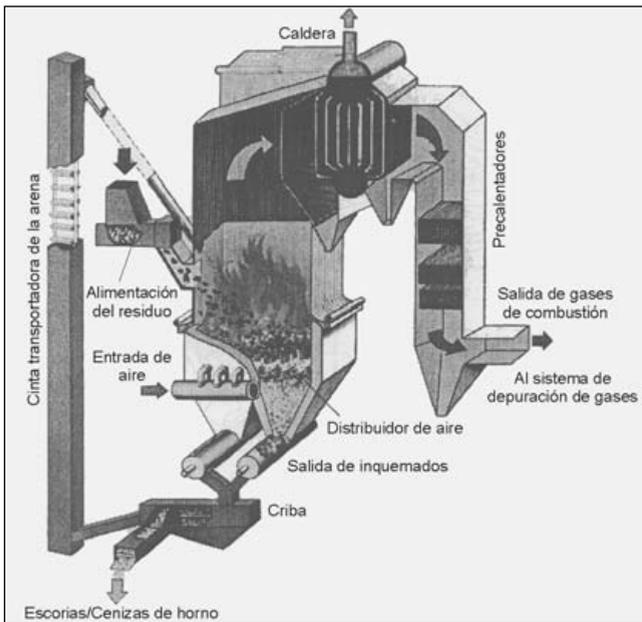
nos de incineración estas condiciones mínimas de temperatura, tiempo y concentración de oxígeno (6%), obliga a instalar recintos aislados térmicamente —cámaras de postcombustión— y quemadores de apoyo para elevar la temperatura cuando es necesario.

En la figura 2 se muestra la fotografía de uno de los tres hornos de lecho fluidizado instalado en Valdemingómez.

### 2.3. Enfriamiento de los gases y recuperación de energía

Los gases de combustión generados en el horno atraviesan una caldera en la que se produce el intercambio de calor. La elevada temperatura de estos gases permite generar vapor a alta presión para obtener energía mediante una turbina de vapor o simplemente para calentar el agua. Cuando los gases de combustión se ponen en contacto con los tubos de la caldera se produce un descenso de su temperatura hasta valores inferiores a 200°C.

En la figura 3 se muestra el procedimiento empleado para recuperar el calor de combustión. El equipo anterior a la caldera es un horno de lecho fluidizado circulante en el que se puede observar la separación de las escorias y la recirculación de las partículas que constituyen el lecho.



**Figura 3.** Horno de lecho fluidizado circulante y caldera de recuperación del calor de combustión para obtener vapor.

Dentro del intervalo comprendido entre los 400°C y los 200°C se produce la formación de las denominadas dioxinas “de novo”, siempre que en la corriente de gases estén presentes sus constituyentes (compuestos clorados, compuestos orgánicos, monóxido de carbono, partículas, metales) y el tiempo de permanencia sea suficientemente elevado; el proceso de formación se favorece si existen núcleos de retención y catalizadores. Como todos estos ingredientes están presentes, en mayor o menor medida en los gases formados en el proceso de incineración, la rapidez con que se produce el descenso de temperatura es la principal variable de operación para dificultar la formación de estos contaminantes.

Una parte de las cenizas volantes arrastradas por la corriente de gas quedan adheridas a los tubos de la caldera y empeoran el intercambio de calor entre gases y agua por lo que es necesario disponer de métodos capaces de eliminarlas continuamente, de modo que la propia caldera actúa también como equipo de retención de partículas. Las diferentes secciones de la caldera se diseñan para que las velocidades de los gases minimicen la erosión, la corrosión y la retención.

Las condiciones del vapor deben permitir que la corrosión en la caldera sea mínima y que el rendimiento de conversión de energía en el turbogruppo sea eleva-

do. El rendimiento energético que se logra en una incineradora de residuos que tengan un poder calorífico superior a 13 MJ/kg puede oscilar entre el 20 y el 30%.

## 2.4. Depuración de los gases de combustión

Las emisiones gaseosas están consideradas como la principal fuente de contaminación potencial que existe en una incineradora. Los agentes contaminantes que pueden encontrarse en los gases de combustión son los compuestos de cloro, los de fluor, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, sustancias orgánicas, partículas, metales pesados y dioxinas y furanos. Los controles establecidos en los documentos legales de los diferentes Estados y organismos supranacionales pretenden, en función del estado de la técnica, hacer compatible la posible contaminación originada en el entorno de estas instalaciones con los beneficios que presenta la eliminación de los residuos por incineración. La normativa de incineración ha evolucionado con el tiempo, varía con los países e incluso con el tipo de residuo. Por ejemplo, la legislación española sobre la incineración de los residuos se muestra en la tabla 2. El R.D. 1088 de 1992 corresponde a residuos urbanos, el R.D. 1217 de 1997 a residuos peligrosos y el R.D. 653 de 2003, transposición de la Directiva Europea 2000/76 /CE no establece diferencias entre los límites de emisión correspondientes a residuos peligrosos y no peligrosos.

Las valores de las medidas que se realicen para verificar el cumplimiento de los valores límite de los contaminantes que aparecen en la tabla 2 deben referirse a una temperatura de 273 K, una presión de 101,2 kPa, a gas seco y a un contenido de oxígeno del 11% en el gas. La necesidad de normalizar la concentración de los contaminantes permite controlar las cantidades emitidas y evitar la posibilidad de introducir aire en el algún punto del sistema para diluir la corriente.

Con el nombre de dioxinas y furanos se incluyen los 210 (75+135) compuestos clorados de la dibenzo-para-dioxina y del dibenzofurano. El límite de emisión es casi un millón de veces menor que el establecido para los contaminantes metálicos más peligrosos, debido a las características que presentan algunos de estos compuestos: son bioacumulables (mucho más solubles en las grasas que en agua), 17 congéneres son muy

| CONTAMINANTE  | R.D. 1088<br>1992 | R.D. 1217<br>1997 | R.D. 653<br>2003 |
|---|-------------------|-------------------|------------------|
| Partículas Totales, (mg/Nm <sup>3</sup> )           | 39                | 10                | 10               |
| Monóxido de carbono, (mg/Nm <sup>3</sup> )          | 100               | 50                | 50               |
| Sustancias orgánicas gas, COT (mg/Nm <sup>3</sup> ) | 20                | 10                | 10               |
| Cloruro de hidrógeno, mg/Nm <sup>3</sup>            | 65                | 10                | 10               |
| Fluoruro de hidrógeno, mg/Nm <sup>3</sup>           | 2                 | 1                 | 1                |
| Dióxido de azufre, mg/Nm <sup>3</sup>               | 300               | 50                | 50               |
| Pb+Cr+Cu+Mn, (mg/Nm <sup>3</sup> )                  | 5                 | ---               | ---              |
| Ni+As, (mg/Nm <sup>3</sup> )                        | 1                 | ---               | ---              |
| Pb+Cr+Cu+Mn+Ni+As+Sb+V, (mg/Nm <sup>3</sup> )       | ---               | 0,5               | 0,5              |
| Cd+Hg, (mg/Nm <sup>3</sup> )                        | ---               | ---               | ---              |
| Cd+Tl, (mg/Nm <sup>3</sup> )                        | ---               | 0,05              | 0,05             |
| Hg, (mg/Nm <sup>3</sup> )                           | ---               | 0,05              | 0,05             |
| Dioxinas y furanos, (ng/Nm <sup>3</sup> )           | Com. Autón.       | 0,1               | 0,1              |
| NO+NO <sub>2</sub> , (mg/Nm <sup>3</sup> )          | No limitado       | No limitado       | 200              |

**Tabla 2.** Valores máximos de emisión de las incineradoras. Legislación española.

tóxicos (la 2,3,7,8 Tetraclodibenzodioxina es el compuesto de mayor toxicidad que ha sintetizado el hombre), son refractarios (son estables a temperaturas tan elevadas como los 600°C) y persistentes (no se destruyen significativamente en las condiciones ambientales). Al no tener todos los compuestos la misma toxicidad, la concentración total de dioxinas y furanos se determina multiplicando la concentración de cada uno de ellos por el factor de equivalencia tóxica que aparece en la tabla 3. La suma de estos 17 productos es el valor de equivalencia tóxica y es la medida que no puede superar el valor de 0,1ng/Nm<sup>3</sup>. El periodo durante el que debe realizarse la toma de muestra para realizar el análisis de estos contaminantes es de 6 a 8 hr.

La actual Directiva europea relativa a la incineración de residuos establece también valores máximos

de emisión para el vertido de aguas residuales procedentes de la depuración de gases de escape. Las sustancias contaminantes objeto de limitación son el total de sólidos en suspensión, los distintos metales pesados y las dioxinas y furanos.

Es preciso equipar la incineradora con técnicas de depuración que sean capaces de retener o transformar cada uno de los contaminantes para no superar el límite establecido por la legislación. La corriente de gases que se ha formado como resultado de la incineración está formada principalmente por el nitrógeno del aire, el oxígeno alimentado en exceso, dióxido de carbono y vapor de agua. Los componentes minoritarios de esta corriente son las partículas sólidas, los gases ácidos, el monóxido de carbono y los compuestos orgánicos y compuestos metálicos volátiles. Todos estos componentes minoritarios constituyen las sustancias conta-

| DIOXINAS                              | F.E.  | FURANOS                              | F.E.  |
|---------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|
| 2,3,7,8Tetraclorodibenzodioxina       | 1     | 2,3,7,8Tetraclorodibenzofurano       | 0,1   |
| 1,2,3,7,8Pentaclorodibenzodioxina     | 0,5   | 2,3,4,7,8Pentaclorodibenzofurano     | 0,5   |
| 1,2,3,4,7,8Hexaclorodibenzodioxina    | 0,1   | 1,2,3,7,8Pentaclorodibenzofurano     | 0,05  |
| 1,2,3,6,7,8Hexaclorodibenzodioxina    | 0,1   | 1,2,3,4,7,8Hexaclorodibenzofurano    | 0,1   |
| 1,2,3,7,8,9Hexaclorodibenzodioxina    | 0,1   | 1,2,3,6,7,8Hexaclorodibenzofurano    | 0,1   |
| 1,2,3,4,6,7,8Heptaclorodibenzodioxina | 0,01  | 1,2,3,7,8,9Hexaclorodibenzofurano    | 0,1   |
| Octaclorodibenzodioxina               | 0,001 | 2,3,4,6,7,8Hexaclorodibenzofurano    | 0,1   |
|                                       |       | 1,2,3,4,6,7,8Heptaclorodibenzofurano | 0,01  |
|                                       |       | 1,2,3,4,7,8,9Heptaclorodibenzofurano | 0,01  |
|                                       |       | Octaclorodibenzofurano               | 0,001 |

**Tabla 3.** Factores de equivalencia para las dibenzo-para- dioxinas y los dibenzofuranos.

minantes del proceso de incineración. La normativa legal a que están obligadas las instalaciones de incineración establece límites para las emisiones de todos estos tipos de contaminantes; límites variables y cada vez más bajos según sea el peligro potencial que se asigne a cada uno de los diferentes grupos que pueden establecerse con todos ellos.

Existe un elevado número de técnicas para eliminar los distintos contaminantes y alcanzar los límites establecidos por la ley. Aunque debe considerarse siempre el sistema de depuración como una unidad —debido a que existen técnicas que depuran varios contaminantes a la vez y a que unas son complementarias de otras o las condicionan— es necesario establecer un criterio para poder analizarlas en función del objetivo fundamental que persiguen. Atendiendo a las características de las técnicas de depuración se pueden establecer cuatro grupos, dependiendo del tipo de contaminante sobre el que se pretende actuar y el modo de actuación:

Técnicas de retención de partículas.

Métodos para retener compuestos ácidos.

Métodos de retención sobre adsorbentes.

Métodos para transformar los compuestos en N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

La selección y combinación de diferentes técnicas de estos grupos permiten diseñar el sistema de depuración apropiado a la corriente de gases a tratar y a los límites de emisión planteados como objetivos inmediatos y futuros.

El procedimiento a utilizar para retener las partículas arrastradas por los gases de escape depende de factores tales como el nivel de depuración a alcanzar, el tipo de incinerador empleado en el tratamiento de los residuos, las características de estos, las condiciones de operación del horno, las propiedades de la corriente de gases, etc. La cantidad de partículas que llevan los gases depende de la velocidad del gas que está en contacto con el sólido del horno, del tamaño y densidad de las partículas, así como de la composición de la alimentación y de los reactivos empleados para de retención de otros contaminantes.

Las técnicas más empleadas son los ciclones, precipitadores electrostáticos, filtros de mangas y filtros cerámicos. La eficacia de cada uno de estos equipos varía con el tamaño de las partículas a retener. Así, mientras que los ciclones tienen eficacias inferiores al 75% para partículas de 10 micrómetros, los filtros de mangas alcanzan el 98% para 0,5 micrómetros y los



**Figura 4.** Filtro de mangas y cenizas volantes retenidas.

filtros cerámicos superan el 99% con partículas de 0,1 micrómetros. Aunque hay otros factores —coste de instalación, de operación, tamaño, resistencia a la temperatura o a los gases ácidos— que pueden aconsejar el empleo de métodos menos eficaces, los límites actuales de emisión de partículas imponen el empleo de los filtros de mangas o los cerámicos en las instalaciones, independientemente de que se empleen o no métodos secos de depuración. No obstante, cuando la concentración de partículas en los gases de escape es elevada se emplean precipitadores electrostáticos o ciclones para efectuar una primera retención. En la figura 4 se muestra una parte de un filtro de mangas y las cenizas volantes retenidas con esta técnica.

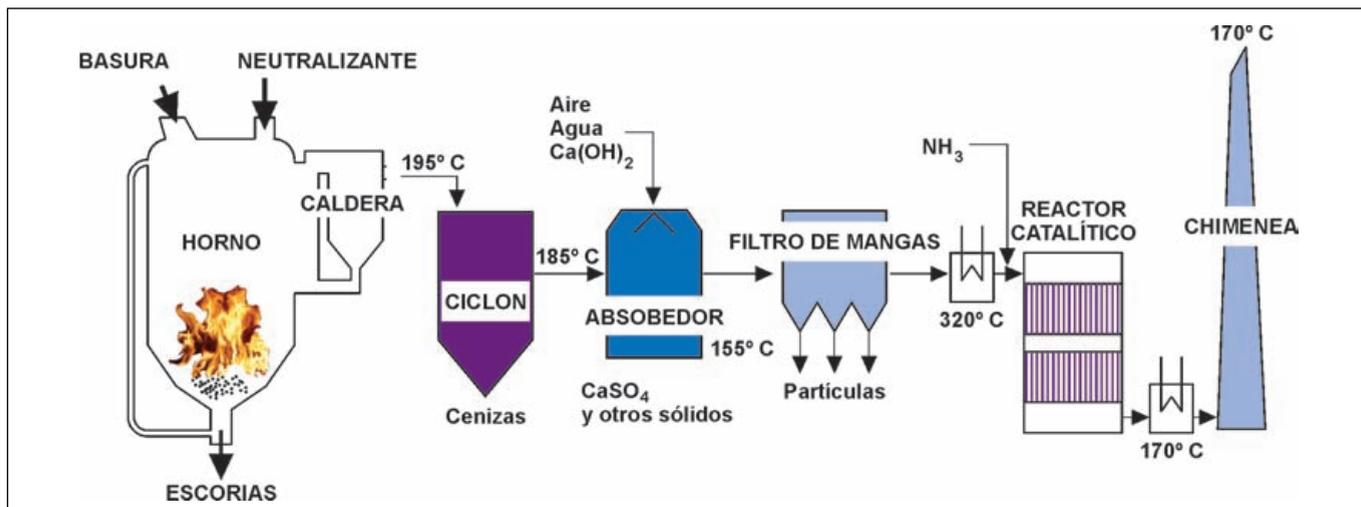
Los contaminantes ácidos que contiene la corriente de gases, dióxido de azufre, cloruro de hidrogeno y fluoruro de hidrógeno, se retienen por reacción con un compuesto básico. Los diferentes procedimientos per-

miten que la reacción se pueda efectuar en fase sólida, líquida o en ambas a la vez.

Los denominados métodos secos consisten en la introducción de reactivos sólidos básicos en la corriente gaseosa para neutralizar estos contaminantes. Los materiales empleados deben tener la granulometría y reactividad apropiada para que el tiempo de contacto no sea excesivamente grande (sería necesario un tamaño de instalación técnicamente inviable) ya que al tratarse de una reacción gas-sólido es un fenómeno lento. El producto resultante, sales formadas en la reacción de neutralización, es un material completamente seco y estable químicamente, lo que facilita su posterior eliminación. Los bajos rendimientos de reactivo básico y la pequeña eficacia del proceso son inconvenientes que limitan su empleo. En operaciones a pequeña escala pueden obviarse estas dificultades empleando compuestos básicos muy reactivos aunque sean mucho más costosos.

Los métodos húmedos se basan en poner en contacto el gas con soluciones acuosas de reactivos básicos (hidróxido sódico, hidróxido cálcico u otros) en torres en las que se establece el contacto entre el gas y el líquido. Las reacciones de neutralización en fase líquida son muy rápidas y los rendimientos elevados siempre que los equipos aporten gran área de contacto. Además, el producto de las reacciones puede clasificarse en fracciones para su reutilización. Estos sistemas de depuración, que tienen como principal inconveniente la inevitable depuración de las aguas contaminadas producidas, son los más extendidos en las plantas de incineración en funcionamiento. La razón se debe probablemente a que fue el primer sistema de depuración empleado, tanto por su sencillez, por su efectividad y coste, como por el efecto sinérgico que supone la retención de otros contaminantes (partículas, óxidos de nitrógeno, dioxinas y furanos).

En los procedimientos semisecos, los gases a depurar se ponen en contacto con el agente neutralizante en forma de lechada que contiene el reactivo básico. El aporte de la lechada de cal se realiza con inyectores que permiten formar una nube de gotas finas en la corriente de gas. Simultáneamente a la neutralización se produce la evaporación del agua empleada para formar la lechada con el consiguiente aumento de la humedad de los gases y del descenso de la temperatu-



**Figura 5.** Esquema de una incineradora con distintos equipos de depuración.

ra. De este modo el absorbente entra en contacto con los gases de escape como un líquido con suficiente humedad para facilitar una rápida absorción de los gases ácidos, pero al mismo tiempo, al evaporarse el agua, solo forma sólidos secos que deben ser eliminados (lo mismo que en los métodos secos) en los equipos correspondientes de retención de partículas. Esta técnica de absorción por rociado permite retenciones del 95% para el HCl y para el HF y del 75% para el SO<sub>2</sub>.

Mediante la tecnología de adsorción se puede retener las dioxinas, compuestos caracterizados, entre otras propiedades singulares, por encontrarse en concentraciones muy pequeñas. El carbón activado, que es el adsorbente más empleado para este fin, debe tener una distribución de tamaños de poro que se adapte al gran tamaño de las moléculas de dioxinas. La modalidad más frecuente de establecer el contacto entre los gases y el carbón activo es la inyección en polvo, denominado método de corriente volante. Este proceso obliga a utilizar un filtro de mangas o un filtro cerámico para retener las partículas inyectadas y para aumentar el tiempo de contacto entre los gases y el carbón. Para evitar el coste debido al consumo de adsorbente y el aumento de la cantidad de cenizas que supone este procedimiento se puede incluir el carbón activado en el filtro de mangas o bien emplearlo formando parte de estructuras monolíticas. Las propiedades del adsorbente hacen que también se adsorban otros contaminantes, ciertos metales pesados como mercurio, presentes en la corriente de gases.

Los procedimientos catalíticos permiten disminuir los niveles de emisión de óxidos de nitrógeno. Con el proceso catalítico denominado SCR (reducción catalítica selectiva) se transforman en nitrógeno y agua por reacción con amoníaco a 240-300°C, según la reacción:



no se ajusta su estequiometría y se incluye el oxígeno presente en los gases de combustión para mostrar que los catalizadores deben ser capaces de oxidar el amoníaco con los óxidos de nitrógeno sin que reaccione con el oxígeno. Además de ser muy selectivos, los catalizadores deben ser muy activos para efectuar la reacción sin necesidad de utilizar exceso de amoníaco, exceso que se incorporaría a la corriente de gases como nuevo contaminante.

Los catalizadores usados en este proceso permiten destruir las dioxinas y furanos si se incorporan materiales que favorecen el proceso de oxidación. El empleo de métodos catalíticos para lograr que la emisión de dioxinas no supere el límite de 0,1 ng/Nm<sup>3</sup> evita el empleo de carbón activado con los consiguientes beneficios ambientales (las dioxinas no acaban incorporadas a las cenizas retenidas en los filtros) y económicos (no hay consumo de adsorbente).

En la figura 5 se representa el esquema de una incineradora que incluye diferentes técnicas de depuración para lograr que los distintos contaminantes regulados por la legislación no superen los límites establecidos.

### 3. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE INCINERACION

La tecnología de incineración de residuos se desarrolló como una alternativa al depósito en vertederos, especialmente en los países con poca disponibilidad de suelo, y como un modo de transformar profundamente aquellos materiales que suponen un riesgo inminente para la salud humana. Cuando las condiciones de combustión eran muy deficientes y no existían sistemas de depuración, los gases de escape se caracterizaban por su gran opacidad y por la elevada concentración de una gran variedad de contaminantes. Fue necesario incorporar técnicas de depuración, electrofiltros, capaces retener partículas y mejorar las condiciones de combustión. Posteriormente se instalaron equipos para obtener energía a partir de los gases de combustión. Al identificarse la presencia de dioxinas en las proximidades de las incineradoras de residuos urbanos y demostrarse la relación de causa a efecto, se implantó una severa legislación destinada a proteger el ambiente de los distintos contaminantes que podían formarse a partir de la gran cantidad de elementos químicos que forman parte de los residuos. Cuando se implantaron estas medidas protectoras ya se había generalizado el rechazo por este modo de gestionar los residuos.

Independientemente de las mejoras ambientales que se han ido incorporando en las últimas décadas, se sigue considerando a la incineración una práctica poco respetuosa con el ambiente y competidora con la prevención y el reciclado de residuos.

La evaluación del proceso de incineración debe basarse en una serie de criterios, a ser posible cuantificables, que tengan en cuenta factores ambientales, económicos y sociales.

- En la incineración se reduce el volumen y el peso de los residuos. Por ejemplo, en una incineradora que procesa residuos sólidos urbanos, cuando se ha realizado previamente la recogida selectiva y/o se han separado los componentes reciclables, la reducción de volumen es del orden del 90-95%. La cantidad de escorias oscila entre el 3-6 %, y la de cenizas volantes, entre el 3-10% dependiendo del método de depuración empleado (los métodos secos o semisecos originan mayor cantidad de cenizas que los métodos húmedos).

- La conversión en energía eléctrica con respecto al poder calorífico inferior varía entre 20 y 30 %. Debido a las pérdidas en los gases de escape —por radiación, en cenizas y escorias— la energía térmica disponible es del 75% de la energía introducida. La transformación de esta energía térmica en energía eléctrica tiene un rendimiento del 30% debido principalmente al vapor de escape de turbina a condensador. Por tanto, se puede aprovechar la energía contenida en los residuos lo que contribuye a disminuir el consumo de combustibles, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero pero debe considerarse un proceso de valorización energética poco eficiente.
- Los costes de depuración son muy elevados debido al gran volumen de gases de combustión y a las exigencias de la normativa legal. La combustión se realiza con gran exceso de aire lo que hace, además de disminuir la eficiencia energética, aumentar el volumen de los gases a depurar. Las elevadas temperaturas de operación favorecen la formación de algunos contaminantes y la volatilización de metales. Se forman dioxinas y furanos, que son contaminantes BTPs, y deben aplicarse procedimientos de depuración muy eficaces para evitar su salida al medio. Esta elevada eficiencia de retención de contaminantes hace que la contribución de las incineradoras a la contaminación de fondo sea pequeña.
- La ocupación de espacio es pequeña y el emplazamiento no depende de las condiciones del subsuelo. Con la experiencia acumulada en la operación con estas instalaciones se puede aceptar que la incineración es una técnica fiable y de alta disponibilidad.

La valoración y cuantificación de estas y de otras características del proceso de incineración, y su comparación con las de los procedimientos alternativos, debe ser el procedimiento para seleccionar el método a emplear en la gestión integral de los residuos.

### 4. CONCLUSIÓN

La incineración es una tecnología que se basa en la oxidación de la materia combustible del residuo utili-

zando una cantidad de oxígeno superior al necesario en la reacción estequiométrica. Con su aplicación se logra disminuir la masa, el volumen y el peligro para la salud y para el medio ambiente de los residuos. Si se aprovecha el calor de combustión para obtener energía se logra valorizar el residuo como combustible. También produce residuos sólidos y diferentes contaminantes que se emiten en la corriente gaseosa o en vertidos líquidos. El principal problema ambiental se debe al elevado flujo de gases generado en el horno que arrastra una serie de compuestos cuyos límites máximos están fijados por la Legislación.

En la jerarquía de actuaciones para la gestión de los residuos establecida por la Unión Europea, la incineración ocupa el cuarto lugar, recuperación o valorización, si se genera energía, o el quinto, tratamiento previo a vertedero, si esta generación no se produce. Por ello, solo se debe aplicar a la fracción de rechazo del proceso de reciclado y a aquellos residuos de elevada

concentración de material hidrocarbonado que necesitan reducir su peligrosidad antes del vertido. El cumplimiento de la normativa legal se logra con sistemas de depuración apropiados y se asegura con el control periódico de residuos, emisiones y vertidos.

---

## BIBLIOGRAFÍA

1. LaGrega, M. D. y otros: "Hazardous Waste Management", McGraw-Hill, 1994.
2. Corbitt, R. A.: "Standard Handbook of Environmental Engineering", McGraw-Hill, 1990.
3. Freeman, H.M. "Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal", McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup> ed., 1998.
4. Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.