

# INCINERACION DE R.S.U. EN HORNOS DE PARRILLA

## PARAMETROS BASICOS DE DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO

*Este artículo trata de justificar la incineración como una solución importante para el tratamiento de residuos sólidos urbanos. Se muestra cómo los residuos, incluso los de bajo poder calorífico, pueden incinerarse manteniendo la temperatura de los gases por encima de los mínimos legales.*

*El cálculo sencillo de la incineración de un residuo urbano típico, ayudado por gráficos prácticos, nos lleva a determinar los parámetros básicos del horno en una aproximación al proyecto del mismo.*

JAIME NIETO  
RESA

### 1. INTRODUCCION

El diseño de un horno de parrilla para incinerar residuos sólidos urbanos debe considerar un conjunto de factores que van desde las propiedades de los residuos, el cálculo de los volúmenes de aire y gases, el cálculo de la temperatura de combustión, hasta la determinación de las dimensiones de la parrilla y de la cámara de combustión.

Las unidades de incineración se diseñan para un período de funcionamiento de 20 a 25 años, por lo que es preciso dimensionar equipos capaces de manejar la amplia variabilidad de condiciones de trabajo que se presentarán debido a las cambiantes propiedades de los residuos, tanto estacionalmente como por su evolución en el futuro.

En este artículo estudiamos una serie de aspectos que deben ser considerados conjuntamente por el diseñador con el objeto de realizar un proyecto correcto, que permita a los explotadores de la planta mantener la alta calidad ambiental que se exige a estas instalaciones.

### 2. PROPIEDADES FISICAS DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS

Las propiedades más importantes de los residuos, desde el punto de vista de la incineración son:

#### a) Densidad

Deben esperarse valores entre 0,1 y 0,3 t/m<sup>3</sup>. Esta variabilidad afecta a los accesorios de manutención de la planta incineradora y exige una alta capacidad de regulación del alimentador de residuos al horno, puesto que los cambios de densidad pueden ser relativamente rápidos.

#### b) Resistencia al paso del aire

Esta resistencia depende de la densidad de los residuos y de su antigüedad. En general, se obtienen pérdidas de carga de 20 mm de columna de agua por cada 100 mm de altura de capa, para un residuo de 0,25 t/m<sup>3</sup> de densidad. Sin embargo, en caso de basuras compactadas, muy húmedas o con concentraciones extremas de residuos de vegetales, los valores pueden desviarse del valor medio en un factor de 3, tanto aumentando

como disminuyendo. Por ello, el ventilador de aire primario debe tener una gran flexibilidad para mantener las condiciones de trabajo ante situaciones tan variables.

### c) Inflamabilidad

Es la temperatura a la cual se produce la auto combustión de la basura. Depende fuertemente del contenido de humedad de los residuos, ya que la evaporación del agua enfría la masa de residuos impidiendo su combustión. Debido a ello, en el diseño de la parrilla se asigna una longitud o tiempo de residencia adecuado para que los residuos tengan tiempo de secarse, antes de iniciar la combustión.

## 3. COMPOSICION DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS

La gran variabilidad y heterogeneidad de los residuos hace difícil establecer la composición actual de los que se producen en una zona determinada. Sin embargo, se dispone en general de análisis sistemáticos que permiten establecer los márgenes dentro de los que se mueven los distintos componentes. En la Tabla I se recoge la variabilidad típica de éstos en España, y, como ejemplo, la composición de los residuos de dos unidades españolas.

Los porcentajes de la Tabla I incluyen la humedad contenida en los residuos, que a su vez puede variar entre el 25 y el 60% respecto al total.

Este análisis por componentes puede agruparse en las tres fracciones siguientes, con sus márgenes de variación:

- Contenido en agua: 25 - 60%
- Contenido en combustibles: 15 - 50%
- Contenido en inertes: 15 - 40%

Esta agrupación de fracciones permite utilizar un gráfico triangular como el de la figura 1, en el cual se representan los contenidos de agua/combustible/inertes en cada uno de los lados del triángulo. Su uso permite visualizar la evolución de los residuos mediante la representación de las áreas ocupadas. En el gráfico se han representado la posición de los plásticos, del papel cartón y de los residuos de verano/primavera y

Tabla I  
Composición de los R.S.U. en España (% en peso)

|                  | España    | Murcia | Barcelona |
|------------------|-----------|--------|-----------|
| Materia orgánica | 40 al 55% | 45%    | 43%       |
| Papel/Cartón     | 15 al 25% | 25%    | 22%       |
| Plásticos        | 10 al 15% | 5%     | 13%       |
| Madera           | 1 al 3%   | 3%     | 3%        |
| Textiles         | 2 al 7%   | 2%     | 2%        |
| Vidrio           | 5 al 12%  | 8%     | 7%        |
| Metales          | 3 al 5%   | 6%     | 3%        |
| Otros            | 4 al 6%   | 6%     | 6%        |

los de otoño/invierno. En el lado derecho inferior del triángulo se encuentran los residuos más secos y combustibles, mientras que en el vértice superior los más húmedos.

Por último, otra forma de presentar el análisis de un residuo es mediante su composición elemental, es decir, determinando el contenido de cada elemento químico: carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, azufre, etc. A pesar de la dificultad de su realización, esta presentación es útil para los cálculos, como se verá más adelante.

## 4. PODER CALORIFICO DE LOS RESIDUOS

Si se utiliza un análisis por componentes, puede estimarse el Poder Calorífico Inferior (P.C.I.) de los residuos utilizando los P.C.I. de cada componente ponderado según el porcentaje en peso real, teniendo en cuenta el contenido de humedad de cada uno.

Más sencillo es utilizar el porcentaje en fracciones agua/combustibles/inertes, asignando un valor del P.C.I. de los combustibles, variable entre 4.000 y 6.000 kcal/kg y restando el calor necesario para la vaporización de la humedad.

En general, se estima que la materia orgánica seca tiene un muy bajo o nulo poder calorífico, lo que ha llevado a usar gráficos con entradas por contenido de combustibles y contenido de humedad y salida de P.C.I.

Si se dispone del análisis elemen-

tal, pueden utilizarse fórmulas como la siguiente:

$$PCI = 81 [C] + 25 [S] + 290 ([H] - \frac{[O]}{8}) - 6 [W] \text{ kcal/kg}$$

expresando los contenidos de carbono, azufre, hidrógeno, oxígeno y agua en porcentaje en peso.

En la Tabla II, a título de ejemplo, realizamos el cálculo para dos tipos de residuos, expresados en su composición por fracciones. La primera composición corresponde a un residuo de bajo poder calorífico producido por una ciudad de tipo pequeño, poco industrial, mientras que la segunda composición corresponde a una ciudad de elevado nivel de vida, como podríamos encontrar en ciudades del norte de Europa. En los EE.UU. los residuos sólidos urbanos tienen poderes caloríficos mucho más altos, alcanzando valores entre 2.500 y 3.500 kcal/kg, debido al bajo contenido de materia orgánica y humedad que los caracteriza.

El conocimiento del análisis por menorizado de la fracción combustible (papel, cartón, plásticos, textiles, gomas, madera, etc.) permitiría afinar el valor aproximado del poder calorífico usado en estos cálculos.

El resultado del trabajo analítico, realizado sistemáticamente sobre los residuos sólidos urbanos en el área geográfica correspondiente permite:

- Obtener los máximos y mínimos absolutos del P.C.I. de los residuos.

- Obtener la variación estacional del P.C.I.

- Obtener la tendencia o ritmo de crecimiento del P.C.I.

Valores todos de la máxima importancia al determinar el tamaño y número de los hornos de incineración, la forma geométrica de los mismos, determinar las temperaturas de precalentamiento de aire necesarias, la posición y el tipo de los quemadores auxiliares, calcular el balance de materias, y definir otros muchos detalles de diseño.

## 5. DIAGRAMA DE COMBUSTION

Es un importante elemento de diseño de la instalación de incineración, puesto que condensa toda la información acumulada durante las campañas de análisis en una herramienta válida tanto a efectos de especificación de las unidades, como para el control de su funcionamiento.

En un sistema de coordenadas se sitúa en abscisas la capacidad mecánica de la instalación (t/h de RSU) a incinerar y en ordenadas la capacidad térmica o capacidad horaria de aportación de calor al horno. Para cada carga mecánica de residuos al horno se tendrá una liberación de calor, que depende del P.C.I. del residuo. Para cada P.C.I. se tiene una recta, ya que:

$$(t/h) * (P.C.I.) \text{ kcal/kg} = \text{kcal/h liberadas en el horno.}$$

En este sistema de coordenadas se sitúa el siguiente punto:

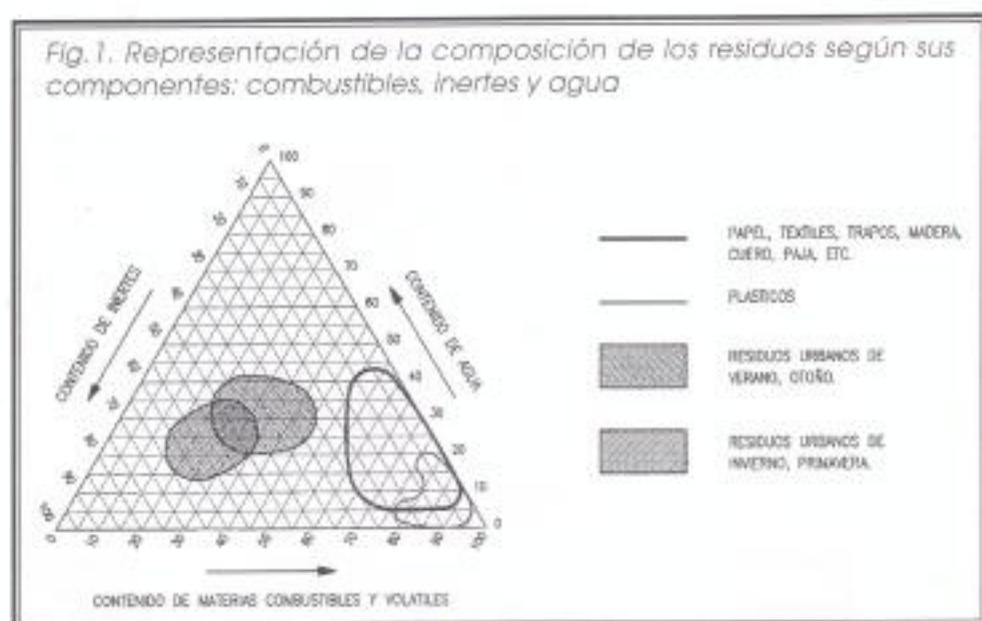


Tabla II  
Cálculo del poder calorífico de dos tipos de residuos

| Fracciones        | % en peso   | Poder calorífico | Contribución de cada fracción al poder calorífico |
|-------------------|-------------|------------------|---|
| <b>RESIDUO 1:</b> |             |                  |   |
| Materia orgánica  | 45%         | 0 kcal/kg        | 0 kcal/kg   |
| Combustibles      | 35%         | 4.800 kcal/kg    | + 1.680 kcal/kg                                   |
| Inertes           | 20%         | 0 kcal/kg        | 0 kcal/kg   |
| <b>TOTAL</b>      | <b>100%</b> |                  |   |
| Humedad           | 45%         | (-600) kcal/kg   | -270 kcal/kg                                      |
| <b>TOTAL</b>      |             |                  | <b>1.410 kcal/kg</b>                              |
| <b>RESIDUO 2:</b> |             |                  |   |
| Materia orgánica  | 35%         | 0                | 0 kcal/kg   |
| Combustibles      | 50%         | 4.800            | + 2.400 kcal/kg                                   |
| Inertes           | 15%         | 0                | 0 kcal/kg   |
| <b>TOTAL</b>      | <b>100%</b> |                  |   |
| Humedad           | 35%         | (-600)           | -210 kcal/kg                                      |
| <b>TOTAL</b>      |             |                  | <b>2.190 kcal/kg</b>                              |

- Abscisas: Capacidad máxima o nominal: t/h de capacidad mecánica.

- Ordenadas: P.C.I. de los R.S.U. que se espera como máximo.

Este punto fija la carga térmica máxima de la instalación. Esto corresponde a un valor de la aportación de calor al horno que será el de diseño de la instalación tanto desde el punto de vista del tamaño de la cámara de combustión, como de la capacidad de intercambio de la caldera y de los equipos de aprovechamiento energético subsiguientes.

Este valor del P.C.I. no significa que no se puedan admitir residuos con P.C.I. superiores, al especificado; es posible tratar P.C.I. superiores limitando la carga mecánica, de manera que siempre se cumpla que:

$$(t/h \text{ alimentadas}) * (P.C.I. \text{ de los residuos}) * \text{carga térmica máxima de diseño de la instalación.}$$

Para completar la especificación del diagrama, se da al constructor el siguiente punto.

- Abscisas: Capacidad mecánica mínima, t/h.

Es decir, las t/h mínimas a las que se exige que el sistema de combustión funcione correctamente y dando los rendimientos y garantías que se especifican para todo el diagrama.

- Ordenadas: P.C.I. mínimo de trabajo.

Se especifica el valor mínimo de P.C.I. que se considera llegará a la instalación y con el cual debe poderse trabajar, manteniendo las garantías y rendimientos.

El constructor del horno completa el diagrama determinando las siguientes importantes zonas.

- Zona en la que es necesario el uso de combustible auxiliar.

- Zona en la que es necesario el precalentamiento del aire de combustión y las temperaturas de precalentamiento necesarias.

- Margen de sobredimensionamiento para sobrecargas temporales.

- P.C.I. máximo admisible en la instalación.

Se trata pues de un diagrama que delimita un área cerrada, dentro de la cual el constructor garantiza una calidad de combustión, materializada en:

- Bajo contenido de inquemados en escorias y en cenizas volantes.
- Estabilidad en el desprendimiento de calor, obtenidos gracias al correcto control del flujo de alimentación de residuos y del aire de combustión a través de la parrilla.
- Muy bajo nivel de inquemados y de contenido de CO en los gases de combustión.
- Temperaturas de gases de combustión consistentemente por encima de la especificada en la legislación, 850°C.
- Exceso de oxígeno, tras la adición de aire secundario, superior al 6% en volumen.
- Mantenimiento de un exceso de aire de combustión entre unos límites de 1,7 a 2, lo que permite unos rendimientos de combustión elevados, en torno al 80%.

Todos estos parámetros pueden mantenerse sin dificultades en un horno de incineración como los que se comercializan modernamente.

La clave de ellos está en la experiencia operativa acumulada por los constructores y operadores, del diseño de todos los elementos auxiliares y de la precisión y rapidez de respuesta que proporcionan los actuales equipos de control electrónico.

En la figura 2 se representan un ejemplo de diagrama de combustión.

## 6. PROCESO DE INCINERACION

Dentro del horno, los residuos se desplazan sobre la parrilla, mientras tienen lugar los siguientes procesos:

- Temperatura entre 100 y 250°C.

Se produce el secado de los resi-

duos debido a la acción del aire de combustión (calentado o no en función del contenido de humedad de los residuos).

- Temperatura entre 250 y 600°C.

Empieza la combustión por radiación del calor procedente del refractario y de la masa de gases en combustión.

Además de la combustión se desprenden diferentes tipos de gases procedentes de la descomposición térmica y carbonización de los residuos.

- Temperatura entre 600 y 800°C.

Combustión generalizada en toda la masa del combustible. Descomposición térmica de los gases producidos y posterior combustión.

- Temperatura entre 800 y 1.200°C.

Combustión de los productos de carbonización y formación de escorias. Finalmente la escoria agotada se enfría parcialmente con el aire insuflado en la zona final de la parrilla.

Los procesos descritos corresponden a las fases de:

- Secado.
- Desgasificación.
- Gasificación y combustión del carbono sólido.
- Agotamiento de la escoria.

En fase gas se producen la combustión de los productos de la desgasificación y gasificación.

## 7. TIPOS DE PARRILLAS USADAS EN HORNOS DE INCINERACION DE RESIDUOS

Se utilizan dos tipos de parrillas:

- *De rodillos:*

Formada por una serie de cinco o seis rodillos de ejes horizontales, cuyo plano está inclinado respecto al horizontal entre 20 y 25 grados. El diámetro de los rodillos es del orden de 1,5 m.

Cada rodillo tiene un accionamiento independiente de velocidad variable, formando grupos para:

- Secado: primer rodillo.
- Desgasificación y combustión: del segundo al cuarto rodillo.
- Agotamiento: los dos últimos rodillos.

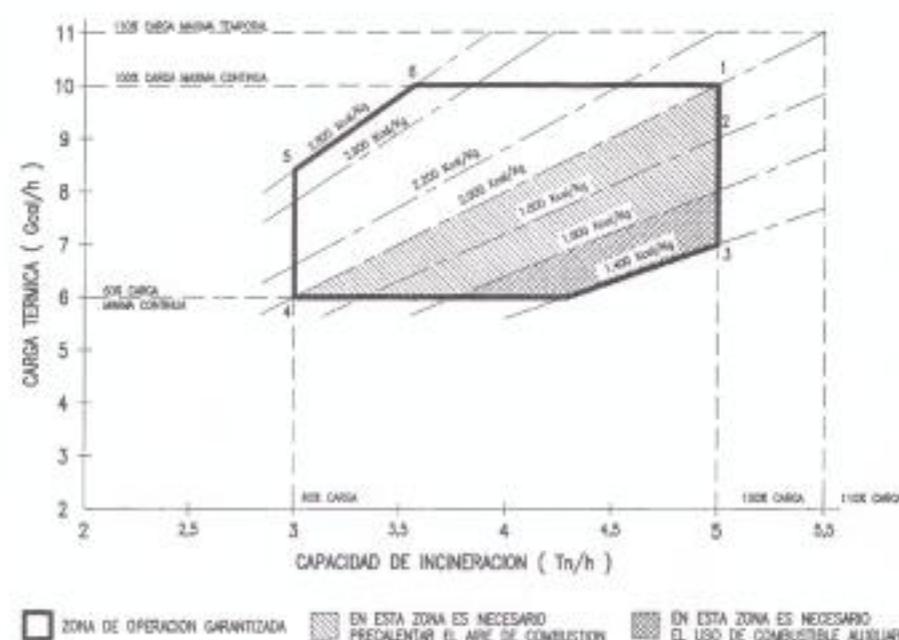
- *De gradas:*

De este tipo existen varios modelos. En general, se disponen sobre un plano generalmente inclinado gradas alternativamente fijas y móviles en varias secciones, para poder variar las velocidades por zonas.

Las gradas móviles tienen la misión de voltear y hacer avanzar los residuos hacia la salida del horno. En algunos casos, el volteo se favorece con escalones entre las secciones.

En general, ambos tipos de parrillas son capaces de cumplir con las

Fig.2. Diagrama de combustión



exigencias de calidad de combustión que demanda la legislación medioambiental, como lo demuestra la considerable lista de referencias que poseen los fabricantes de cada tipo. En la práctica, no existe un tipo físicamente "mejor" que otros, puesto que les hubiese desplazado del mercado, si no que se trata de soluciones distintas y correctas al mismo proceso tecnológico.

## 8. AIRE DE COMBUSTION

Disponiendo de un análisis elemental de los residuos, es decir, de la concentración de los elementos químicos C, O, N, S, P, H, etc., el cálculo del  $O_2$  necesario para la combustión estequiométrica se deduce de las correspondientes reacciones químicas de combustión, o utilizando la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Aire mínimo} &= 8,8766 [C] + \\ &+ 26,4433 [H_2] + 3,3248 [S] - \\ &- 3,3319 [O_2] \text{ Nm}^3/\text{kg de R.S.U.} \end{aligned}$$

Si no se dispone de estos datos, pueden usarse con éxito gráficos que establecen correlaciones entre el P.C.I. y el contenido de humedad de los R.S.U. con el volumen de aire en  $\text{Nm}^3/\text{kg}$  de R.S.U. necesarios para la combustión estequiométrica. (Fig. 3).

El aire total se calcula añadiendo el exceso de aire con el que se piensa trabajar. Actualmente es aceptable diseñar con excesos de aire tan bajos como 1,7 como valor nominal, sin embargo los ventiladores deben ser capaces de trabajar con valores más altos, a fin de ser capaces de compensar las oscilaciones de composición del residuo.

El aire total se distribuye en:

- Primario: El que se inyecta por debajo de la parrilla de combustión. Aproximadamente es entre el 60 y el 80% del total.
- Secundario: El que se inyecta a la entrada de la cámara de postcombustión. Varía entre el 20 y el 40% del total.

Algunas tecnologías usan aire terciario para refrigerar las paredes del horno, generalmente con caudal constante.

El sistema de control se encarga de la distribución del aire de combustión, realizando las siguientes funciones:

- Cálculo de caudal total necesario.
- Distribución entre primario y secundario, en función de la temperatura de los gases, el contenido de CO y el contenido de  $O_2$  en los gases a la salida de la caldera.
- En función del tamaño del horno y de la tecnología particular que se use, el sistema de control distribuye el aire primario entre las distintas secciones de la parrilla.

El cálculo del caudal de aire se hace en general en función de la carga del horno y luego se corrige para conseguir los excesos de  $O_2$  especificados.

### 8.1. CONTROL DE LA ADICION DEL AIRE DE COMBUSTION

Partiendo de una estimación inicial del caudal total de aire de combustión, el sistema de control comprueba lo siguiente:

- El contenido de  $O_2$  a la salida de la caldera.
- El contenido de CO a la salida de la caldera.
- La temperatura en la zona de control: después de la adición de aire secundario.

Las reacciones del sistema de control son las siguientes:

- Aumentar en caso de ser necesario el caudal total de aire de modo que se tenga una concentración de  $O_2$  superior al 6% en los gases de combustión a salida de la caldera.
- Efectuar una distribución inicial de aire entre primario y secundario.
- Comprobar que la temperatura de gases es correcta (superior a  $850^\circ\text{C}$ ).
- Redistribuir los aires primario y secundario en función del contenido de monóxido de carbono en los gases de combustión.
- En función de la carga de trabajo pedida por el usuario, redistribución de aire primario por las secciones de parrilla.

No todas las tecnologías siguen los mismos criterios, pero este esquema es el más corrientemente usado. En general, los suministradores ofrecen junto con el horno un algo-

ritmo de control capaz de ejecutar todas estas funciones en paralelo con la operación de la planta. Estos algoritmos liberan parcialmente al operador del trabajo de distribución de aire y control de las condiciones de combustión. No lo liberan de la función de supervisión del funcionamiento del horno (posición del fuego, producción de inquemados, etc.); esta función permite realimentar al sistema de control con informaciones tendientes a optimizar el sistema.

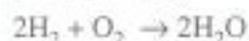
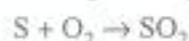
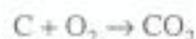
### 8.2. PRECALENTAMIENTO DEL AIRE

Se practica cuando la humedad de los residuos es excesiva y, por consiguiente, el valor conjunto del poder calorífico es bajo. En estos casos, el tiempo de residencia que precisan las basuras en el interior del horno para su secado hasta condiciones de encendido, es excesivo. Este tiempo de secado excesivo se detrae del tiempo de residencia necesario para la buena combustión y agotamiento de los residuos, por lo que es necesario reducirlo a valores normales, favoreciendo la rápida vaporización del agua con el aire caliente.

Generalmente, sólo se calienta el aire primario, a temperaturas entre  $100$  y  $200^\circ\text{C}$ , dependiendo del contenido de humedad. El calentamiento se hace con vapor de agua.

## 9. CALCULO DEL VOLUMEN DE GASES DE COMBUSTION

Si se dispone del análisis elemental de los residuos, es sencillo calcular el volumen de los gases producidos en la combustión a base de las reacciones:



A estos volúmenes se les añaden los del nitrógeno que acompañan al oxígeno y el exceso de aire.

Si no se dispone de este análisis, se pueden usar con éxito gráficos generalizados que relacionan el P.C.I. de los residuos y el contenido de humedad con el volumen y

Fig.3. Volumen de aire teórico para la combustión neutra en función del P.C.I. de los residuos y del contenido de agua

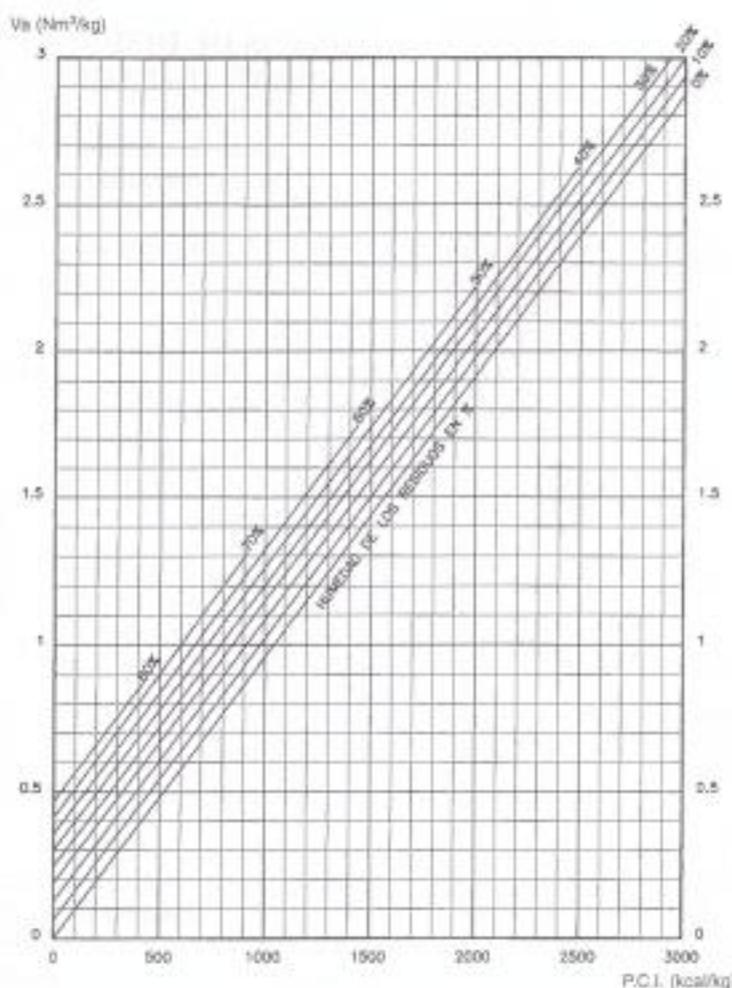
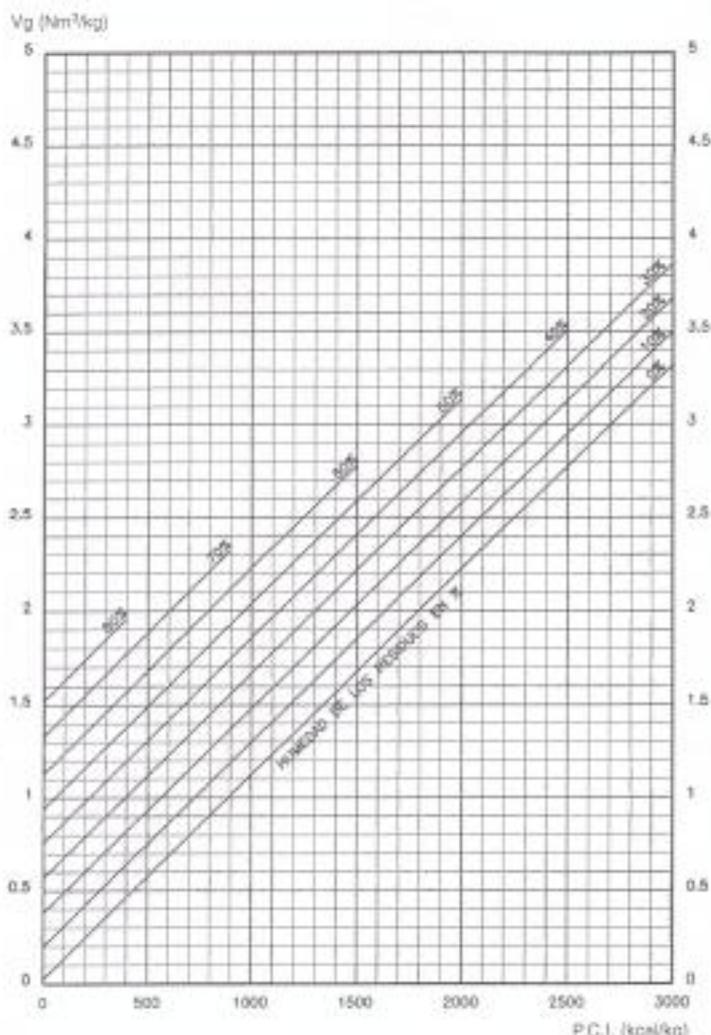


Fig.4. Volumen de gases en combustión neutra en función del P.C.I. de los residuos y del contenido de agua



la composición de gases de combustión generados en el caso teórico de exceso de aire nulos, y combustión perfecta (combustión neutra) (Fig. 4).

Se dispone de varias fórmulas empíricas para calcular el volumen de gases producidos en la combustión. Por ejemplo:

$$\text{Rosi } V_g = 0,89 \frac{\text{PCI}}{1.000} + 1,65$$

$$\text{Veron } V_g = \frac{\text{PCI}}{850}$$

Otra fórmula es:

$$V_g = 1,17 + 0,906 \frac{(\text{PCI} + 550)}{1.000} + 0,906 \frac{(\text{PCI} + 550)}{1.000}$$

Fórmulas que en general tienen el inconveniente de no tener en cuenta el contenido real de humedad de los residuos. Dan mejores resultados cuanto mayores son los P.C.I..

## 10. TEMPERATURA TEORICA DE COMBUSTION

Esta temperatura es la que se obtendría si todo el calor desarrollado por la combustión permanece en los gases, incluyendo el exceso de aire y el calor correspondiente al precalentamiento del aire primario.

Para aclarar completamente el concepto, usaremos el ejemplo siguiente:

- Poder calorífico inferior de los residuos 1.800 kcal/kg.
- Contenido de humedad 45% en peso.
- Exceso de aire 1,7.

La figura 3, aire teórico de combustión, proporciona el valor de 2 Nm³/kg de R.S.U., por lo tanto el aire total será:

$$2 + 0,7 \times 2 = 3,4 \text{ Nm}^3/\text{kg de R.S.U.}$$

La figura 4, volumen de gases en combustión neutra, proporciona el valor 2,85 Nm³/kg de R.S.U..

El volumen total de gases será de:

$$2,85 \text{ Nm}^3 \text{ gases} + 1,4 \text{ Nm}^3 \text{ exceso de aire} = 4,25 \text{ Nm}^3/\text{kg R.S.U.}$$

Para los residuos supuestos al principio de este epígrafe es suficiente calentar el aire primario a 100°C. Definiremos que el aire primario es el 70% del total.

Lo que se pretende es calcular cual es el contenido de calor de los gases de combustión. Para ello debemos determinar el calor útil resultante después de restar las pérdidas y los inquemados. Con equipos bien diseñados, mantenidos y operados es posible conseguir lo siguiente:

- Pérdidas por radiación: inferiores al 2% del calor liberado en el horno.

- Pérdidas por inquemados: inferiores al 2% del calor liberado en el horno.

- Pérdida en el enfriador de escorias: inferiores al 1,5 % del calor liberado en el horno.

El calor útil disponible para calentar los gases de este ejemplo será:

• Precalentamiento de aire:

$$0,7 \times 3,4 \text{ Nm}^3/\text{kg R.S.U.} \times 1,3 \text{ kg/Nm}^3 \times 0,24 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} (100 - 20)^\circ\text{C} = +59 \text{ kcal/kg R.S.U.}$$

• Pérdidas por radiación y convección

$$0,02 \times 1.800 \text{ kcal/kg R.S.U.} = -36 \text{ kcal/kg R.S.U.}$$

• Pérdidas por inquemados

$$0,02 \times 1.800 \text{ kcal/kg R.S.U.} = -36 \text{ kcal/kg R.S.U.}$$

• Pérdidas en el enfriador de escorias:

$$0,015 \times 1.800 \text{ kcal/kg R.S.U.} = -27 \text{ kcal/kg R.S.U.}$$

**TOTAL: -40 kcal/kg R.S.U.**

Por lo tanto, el calor útil será:

$$1.800 \text{ kcal/kg R.S.U.} - 40 \text{ kcal/kg R.S.U.} = 1.760 \text{ kcal/kg R.S.U.}$$

Este calor lo adquirirán los gases de combustión, calculados en 4,25 Nm<sup>3</sup>/kg R.S.U.. La entalpía de estos gases es pues:

$$1.760 \text{ kcal/kg R.S.U.} \div 4,25 \text{ Nm}^3/\text{kg R.S.U.} = 414,11 \text{ kcal/Nm}^3$$

La composición de los gases de combustión puede, aproximadamente, considerarse como la siguiente:

CO<sub>2</sub>: 8% en volumen

H<sub>2</sub>O: 10% en volumen

N<sub>2</sub> + aire: 82% en volumen

Este gas tiene un calor específico medio entre 100 y 1.000°C de 0,36 kcal/°C Nm<sup>3</sup>.

Los gases de nuestro ejemplo alcanzarán una temperatura teórica de combustión de:

$$414,11 \text{ kcal/Nm}^3 \div 0,36 \text{ kcal/}^\circ\text{C Nm}^3 = 1.150 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Para valorar este dato hay que tener en cuenta los supuestos realizados y las condiciones físicas reales de la combustión.

• Sobre la parrilla las temperaturas

son muy distintas en cada punto, dependiendo de la zona de trabajo.

• Dentro de la cámara de combustión las temperaturas tenderán a ser mayores debido a que no se ha introducido el aire secundario.

• El caudal de aire primario es del mismo orden que el de aire mínimo necesario para la combustión, por lo cual quedan gases combustibles sin reaccionar.

• Después de la última inyección de aire de combustión (secundario) es el momento en el que puede considerarse que la temperatura teórica se alcanza. Los fabricantes diseñan la inyección de aire y la geometría del horno de modo que la turbulencia sea lo más alta posible al objeto de favorecer las reacciones finales de combustión, en particular la destrucción de las moléculas de hidrocarburos policíclicas y el paso de monóxido a dióxido de carbono.

Este ejemplo demuestra que en una instalación de combustión de residuos es perfectamente posible obtener altas temperaturas de gases. Además el margen de trabajo es suficientemente amplio, puesto que si se repiten los cálculos para un P.C.I. de 1.400 kcal/kg de R.S.U., tendríamos los siguientes datos:

- Volumen mínimo de aire: 1,62 Nm<sup>3</sup>/kg (Fig. 3).

- Volumen total de gases de combustión: 3,53 Nm<sup>3</sup>/kg (Fig. 4).

Entalpía de los gases:

$$1,362 + 3,53 = 385 \text{ kcal/Nm}^3$$

Temperatura teórica de combustión:

$$385 \text{ kcal/Nm}^3 \div 0,36 \text{ kcal/}^\circ\text{C Nm}^3 = 1.070 \text{ }^\circ\text{C}$$

Todavía por encima de 850°C, mínima especificada por la legislación.

En el caso de P.C.I. más bajos, podría no alcanzarse la temperatura de gases de combustión exigida por el Real Decreto 1088/92. Si esto ocurre, automáticamente arrancan los quemadores auxiliares y modulan su carga al objeto de elevar la temperatura hasta que sea superior a la especificada.

Los quemadores se usan también para caldear el horno y la cámara de postcombustión hasta 850°C antes de iniciar la alimentación de residuos. La posición y características de los quemadores son de la

mayor importancia al objeto de iniciar la combustión, crear turbulencias en los gases y evitar impactos de llama en los refractarios.

## 11. DATOS DE DISEÑO DE UN HORNO DE PARRILLA

Desde el punto de vista de la capacidad térmica y mecánica del conjunto horno-parrilla, se consideran correctos los siguientes datos:

• Carga térmica de la parrilla: entre 500.000 y 900.000 kcal/h m<sup>2</sup>

• Carga mecánica de la parrilla: entre 250 y 450 kg/h m<sup>2</sup>.

• Carga térmica de la cámara de combustión: entre 80.000 y 100.000 kcal/h m<sup>3</sup>.

El punto elegido para el diseño dependerá del poder calorífico inferior de los residuos y de la capacidad de la planta. Pero es importante no sobrepasar la carga térmica de la cámara de combustión, puesto que quedaría disminuida la capacidad mecánica de la instalación.

La geometría del horno es también muy importante para no crear puntos con baja circulación, asegurar la buena turbulencia de los gases y la distribución del calor sobre los residuos en fase de secado, combustión y agotamiento.

Como ejemplo, podemos aplicar estos valores a un horno que debe ser capaz de tratar 5 t/h de R.S.U. en el margen de P.C.I. de 1.400 a 2.200 kcal/kg.

- Carga térmica de la parrilla:

Para cada P.C.I. resulta

$$\frac{5.000 \text{ kg/h} \times 1.400 \text{ kcal/kg}}{500.000 \text{ kcal/h} \times \text{m}^2} = 14 \text{ m}^2$$

$$\frac{5.000 \text{ kg/h} \times 2.200 \text{ kcal/kg}}{900.000 \text{ kcal/h} \times \text{m}^2} = 12,2 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, 14 m<sup>2</sup> serían suficientes para manejar la carga térmica.

- Carga mecánica:

$$\frac{5.000 \text{ kg/h}}{250 \text{ kg/h} \times \text{m}^2} = 20 \text{ m}^2$$

$$\frac{5.000 \text{ kg/h}}{450 \text{ kg/h} \times \text{m}^2} = 11,1 \text{ m}^2$$

Con lo cual el valor de 14 m<sup>2</sup> puede ser también aceptable.

- Volumen de la cámara de combustión:

$$\frac{5.000 \text{ kg/h} \times 1.400 \text{ kcal/kg}}{80.000 \text{ kcal/h} \times \text{m}^3} = 87,5 \text{ m}^3$$

$$\frac{5.000 \text{ kg/h} \times 2.200 \text{ kcal/kg}}{100.000 \text{ kcal/h} \times \text{m}^3} = 110 \text{ m}^3$$

En este caso debemos elegir el máximo volumen para que no quede limitada la capacidad en los P.C.I. altos.

## 12. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Hemos revisado la composición y propiedades físicas de los residuos sólidos urbanos y su influencia en el diseño de una unidad de incineración.

A continuación hemos visto, a través de un ejemplo, como los P.C.I. usuales de los residuos permiten mantener altas temperaturas de

combustión, superiores a las exigidas en la legislación vigente sobre plantas de incineración, y sin consumo de combustible auxiliar, manteniendo un margen de garantía considerable.

Los distintos tipos de parrillas existentes en el mercado permiten ejecutar los procesos de secado, combustión y agotamiento con alta flexibilidad y con un buen control de la adición de aire frente a la natural variabilidad de las propiedades de los residuos.

Esto, junto con las mejoras de capacidad de los actuales sistemas de control electrónico, permite obtener excelentes calidades de combustión (bajo porcentaje de inquemados, altas temperaturas de combustión, altos rendimientos de combustión, gracias al control del exceso de aire) de una forma fiable y consistente.

Las dimensiones de la parrilla y el volumen de la cámara de combustión pueden delimitarse con precisión debido a la extensa experiencia operativa de la que se dispone en la actualidad.

Todo ello permite diseñar unidades de incineración de residuos sólidos urbanos con una disponibilidad y seguridad de servicio elevadas y manteniendo una calidad medioambiental acorde con la exigencias de la sociedad actual. Por ese motivo, la incineración tiene un puesto importante en el esquema moderno de tratamiento de residuos.

Cabe decir de las instalaciones de incineración de residuos sólidos urbanos que son instalaciones técnicas dotadas de medios de trabajo y de control altamente desarrollados y experimentados, en los que el contacto entre el aire de combustión y los residuos es íntimo y muy eficiente y se dispone de medios de actuación potentes y rápidos para compensar oscilaciones.

Estos equipos permiten mantener en forma consistente una calidad medioambiental muy elevada, como lo prueban las instalaciones existentes en muchos países industrializados.