

ANEXO 9: ESTUDIO DE LA INCENERACIÓN

1.8. ESTUDIO Y RESULTADOS DE LA INCINERACIÓN DE LOS RESIDUOS.

1.8.1. Cantidad teórica de aire en combustión neutra

Si tenemos en cuenta que los principales elementos que intervienen en las reacciones de combustión son el carbono, el hidrógeno, el azufre y el oxígeno, la fórmula que se obtiene para la cantidad teórica de aire en la combustión de un kilogramo de cualquier combustible, es la siguiente:

$$V = 0,0895 \times C + 0,2685 \times H + 0,0335 \times S - 0,0335 \times O$$

en la cual, V es el volumen de aire necesario en Nm³ por Kg. de combustible y C, H, S y O los contenidos en carbono, hidrógeno, azufre y oxígeno, expresados en porcentaje de la masa de combustible.

Ahora bien, este análisis del combustible no se conoce a priori. Sólo se puede determinar el poder calorífico de las muestras, como ya hemos hecho. Además, una instalación de incineración de residuos sólidos no se concibe para un poder calorífico (PCI) determinado, sino para un margen que abarque los PCI susceptibles de corresponder a lo largo de toda la vida de la fábrica. Por eso, nosotros hemos considerado para la gran central térmica, un intervalo de poderes caloríficos de 4.200 a 4.800 kcal/Kg., lo que representa en nuestros cálculos un PCI medio de 4.500 kcal/Kg., muy aproximado al obtenido de los ensayos en el laboratorio.

A partir de los PCI existen fórmulas que, aunque aproximativas, dan los valores de las cantidades de aire para poder controlarlas. Así, para los combustibles sólidos, la fórmula establecida estadísticamente por Rosin y Fehling da, para la cantidad de aire en combustión neutra (sin exceso de aquel), el siguiente valor:

$$V = 1,01 \frac{PCI}{1000} + 0,5$$

estando expresado V en Nm³ por Kg. de combustible y PCI en kcal/Kg .

Análogamente, la fórmula de Véron da:

$$V = \frac{PCI}{1000}$$

1.8.2. Determinación del exceso de aire

La cantidad de calor que se puede liberar por la combustión de 1 Kg. de residuos (PCI) se distribuye en:

- calor sensible de los gases de combustión,
- pérdidas diversas (radiación, inquemados, calor sensible de las escorias y cenizas).

Despreciando, para un cálculo aproximado, las pérdidas diversas (obsérvese que los inquemados no existen por la hipótesis de combustión completa), se puede escribir:

$$PCI = Vg \cdot Cpg \cdot t + Ve \cdot Cpa \cdot t$$

siendo:

PCI = calor utilizable en 1 Kg. de residuos;

Vg = volumen de los gases en Nm³ producidos en la combustión neutra de 1 Kg. de residuos;

Ve = volumen del exceso de aire en Nm³;

Cpg = calor volúmico de calentamiento a presión constante de los gases de combustión entre 0 y t °C, en kcal/ Nm³;

Cpa = calor volúmico de calentamiento a presión constante del aire entre 0 y t °C, en kcal/ Nm³;

t = valor medio de la temperatura de los gases en la cámara de combustión, 950 °C.

De la fórmula anterior sale:

$$Ve = \frac{PCI - Vg \cdot Cpg \cdot t}{Cpa \cdot t}$$

siendo el valor relativo del exceso de aire:

$$e \text{ por } 100 = \frac{Ve}{V} \cdot 100 \quad \text{de donde:} \quad e \text{ por } 100 = \frac{PCI - Vg \cdot Cpg \cdot t}{V \cdot Cpa \cdot t} \cdot 100$$

V: lo hemos obtenido a partir de las fórmulas de Rosin y Fehling y Véron.

Para determinar Vg, existen igualmente fórmulas generales que dan el volumen de los gases producidos en una combustión neutra, en función del PCI:

Fórmula de Rosin y Fehling:

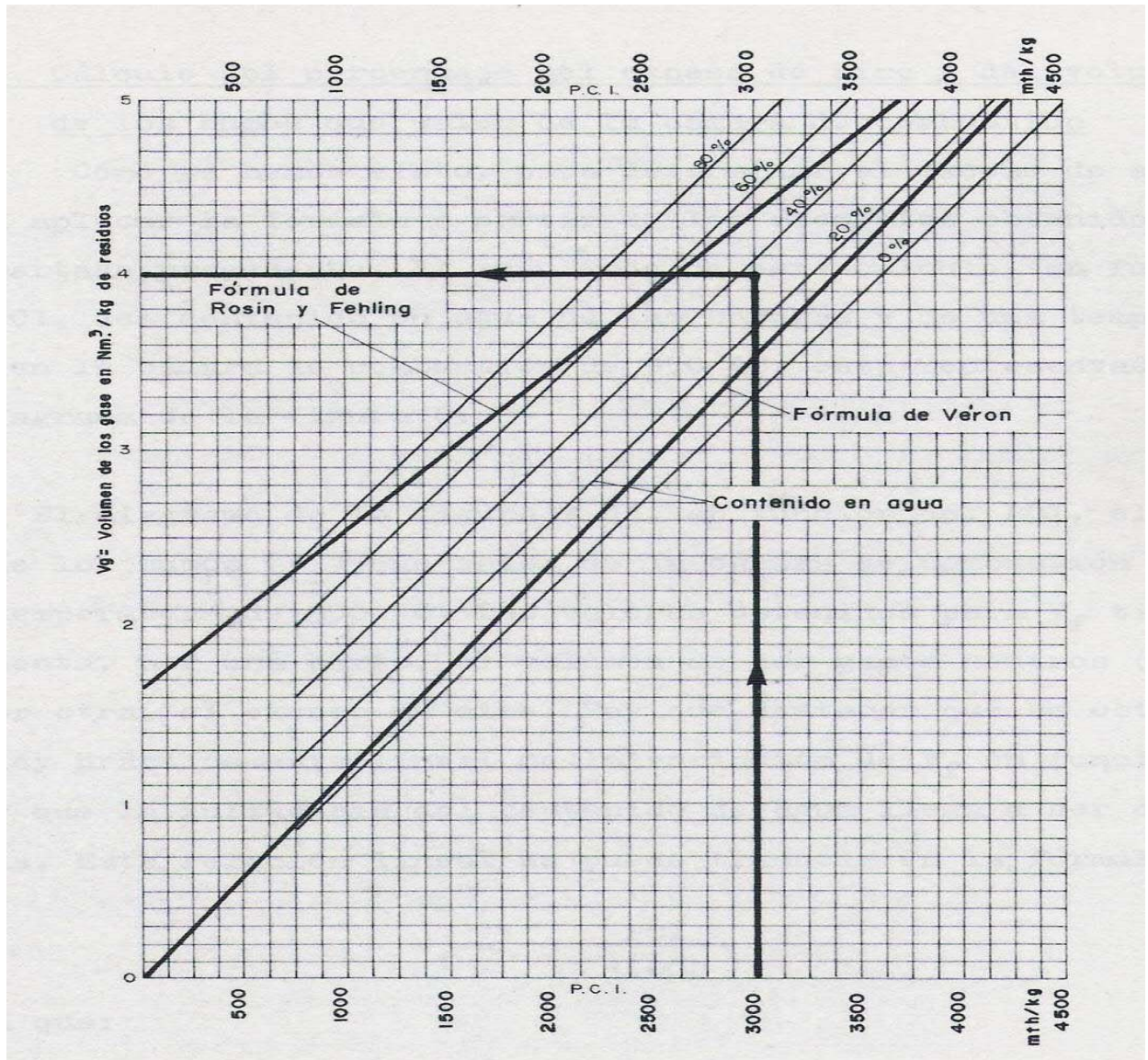
$$Vg = 0,89 \frac{PCI}{1000} + 1,65$$

Fórmula de Véron:

$$Vg = \frac{PCI}{850}$$

En estas dos fórmulas, Vg está expresado en Nm³ por Kg. de combustible y PCI en kcal/Kg.

Sabemos que existen tablas donde también podemos calcular V_g y V , considerando dichas fórmulas y el % de humedad, pero nosotros adaptamos la media ponderada de los dos resultados anteriores; ejemplo de tabla:



Fuente: Optimización de recursos energéticos en centrales de calefacción de complejos urbanos y su aplicación a plantas mixtas de incineración de residuos sólidos y gasóleo.

Finalmente, para los símbolos C_{pa} y C_{pg} , la siguiente tabla 4 da la masa volumétrica para los principales gases que se encuentran en los humos, así como los valores de calentamiento a presión constante en $mth/Nm^3/^\circ C$ para distintas temperaturas, y los valores medios de calentamiento de 0 a

300°C y de 0 a 900°C.

A partir de estos valores y teniendo en cuenta la composición esencialmente celulósica de los residuos, la tabla 5 (la más representativa encontrada) da, en función del PCI y del contenido en agua, los valores medios de calentamiento a presión constante de los gases obtenidos en la combustión neutra (Cpg).

Calor de calentamiento a presión constante (mth/Nm ³ /°C)								
Naturaleza del gas	Masa volúmica	100°	300°	500°	700°	900°	Media de 0 a 300 °C	Media de 0 a 900 °C
Aire	1,293	0,313	0,323	0,337	0,351	0,361	0,315	0,334
Oxígeno	1,429	0,319	0,340	0,358	0,371	0,380	0,324	0,350
Nitrógeno	1,25	0,312	0,318	0,332	0,346	0,356	0,313	0,330
CO ₂	1,977	0,434	0,501	0,547	0,578	0,599	0,451	0,523
Vapor de H ₂ O.	0,806	0,362	0,383	0,408	0,435	0,461	0,368	0,405

	Contenido en agua de las basuras domésticas (Porcentaje)	PCI			
		1.000	2.000	3.000	4.000
Calor medio de calentamiento de 0 a 300 °C (en mth/Nm ³ /°C)	0	0,343	0,341	0,340	0,339
	20	0,349	0,345	0,343	0,342
	40	0,351	0,347	0,345	--
	60	0,351	0,347	--	--
	80	0,353	--	--	--
Calor medio de calentamiento de 0 a 900 °C (en mth/Nm ³ /°C)	0	0,372	0,370	0,368	0,367
	20	0,379	0,374	0,371	0,370
	40	0,382	0,377	0,374	--
	60	0,382	0,377	--	--
	80	0,380	--	--	--

Fuente: Optimización de recursos energéticos en centrales de calefacción de complejos urbanos y su aplicación a plantas mixtas de incineración de residuos sólidos y gasóleo.

1.8.3 Cálculo del porcentaje del exceso de aire y del volumen de los humos que salen de la cámara de combustión.

Cómo ya hemos visto, para determinar el exceso de aire, basta aplicar la fórmula a partir de los elementos obtenidos en el apartado precedente (pero también existen gráficos para sacarlas).

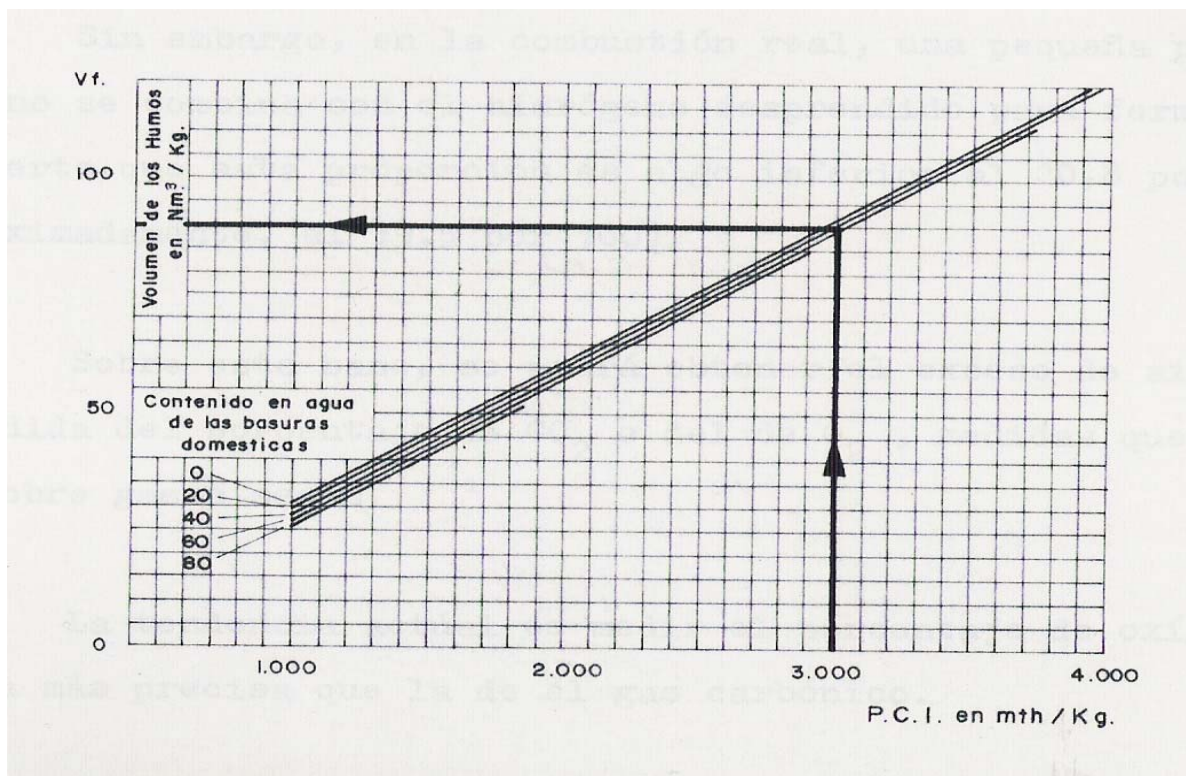
$$e \text{ por } 100 = \frac{PCI - V_g \cdot C_{pg} \cdot t}{V \cdot C_{pa} \cdot t} \cdot 100$$

El diagrama de la figura (que lo tenemos como ejemplo para 3000 kcal/kg en basuras domesticas) da, en función del PCI, el volumen de los humos (V_f) que salen de la cámara de combustión para una temperatura de 950°C. Los valores obtenidos para V_f tienen en cuenta, por una parte, el volumen de los gases neutros (V_g) y, por otra, el exceso de aire.

Hay que destacar que se obtiene una ley prácticamente lineal de la variación de V_f en función del PCI y que la influencia del contenido de agua llega a ser despreciable. Esta relación lineal se puede traducir en la fórmula:

$$V_f = 3 \cdot \frac{PCI}{1000}$$

en la que: V_f es el volumen de los humos que salen de la cámara de combustión para una temperatura de 950°C, expresado en Nm^3 por Kg. de residuos, y el PCI en kcal/Kg.



fuentes: Optimización de recursos energéticos en centrales de calefacción de complejos urbanos y su aplicación a plantas mixtas de incineración de residuos sólidos y gasóleo.

La sencillez de esta fórmula no debe hacer olvidar las hipótesis previas establecidas:

- La temperatura de la cámara de combustión se ha tomado siempre a 950°C, cualquiera que

sea el PCI. Realmente, la experiencia demuestra que con PCI pequeños las temperaturas no alcanzan éste límite, obteniéndose en general las condiciones óptimas de funcionamiento del horno con PCI más elevados, como es el caso que nos ocupa;

- Las pérdidas no se han tomado en consideración, lo que tiene por efecto sobreestimar un poco el exceso de aire;

- En las instalaciones con recuperación de calor en las que la caldera lleve pantallas de agua en la cámara de combustión, la parte de energía térmica absorbida por radiación tiene por consecuencia una disminución del exceso de aire si se mantiene la temperatura.

1.8.4. Resumen de las características térmicas del combustible:

Esta tabla puede variar en función del residuo a utilizar, nosotros utilizaremos principalmente sarmiento de vid pero sin dejar de lado al orujo alcoholizado y desalcoholizado (pendientes de estudio), que hace que varié el poder calorífico, humedad...

De las fórmulas o diagramas de los epígrafes anteriores, hemos obtenido los siguientes resultados:

P.C. inferior medio del residuo	4500 kcal/kg
Contenido medio de humedad.....	15%
Volumen teórico de aire en la C.N.	$V = 4,77 \text{ Nm}^3/\text{kg}$
Volumen de los gases en la C.N.	$V_g = 5,47 \text{ Nm}^3/\text{kg}$
Calor medio de calent. de los gases a 950°C	$C_{pa} = 0,334 \text{ kcal/kg}$
Calor medio de calent. del aire a 950°C	$C_{pg} = 0,365 \text{ kcal/kg}$
Porcentaje de exceso de aire	$V_e = 172\%$
Volumen de los humos a 950°C	$V_f = 13,5 \text{ Nm}^3/\text{kg}$
Peso específico de los humos	$1,250 \text{ kg/Nm}^3$
Escorias y cenizas de los residuos incinerados	40%

1.8.5. Balance térmico:

Siendo la combustión de los residuos sólidos un fenómeno que libera la energía térmica obtenida en los mismos, no puede hacerse un análisis preciso cuantitativo de esta transformación más que con ayuda de balances térmicos parciales o totales.

Los elementos de los balances son necesarios para:

- Controlar la capacidad de incineración de una parrilla, compatible con la tasa máx. impuesta de quemados en las escorias;
- Determinar el PCI de los residuos
- Determinar las características de los gases de combustión, el exceso de aire, la estanqueidad de los arcones, la refrigeración correcta de los gases de combustión, las velocidades de circulación, etc.
- controlar el rendimiento de los eliminadores de polvo de los humos.

Nosotros utilizaremos el balance total para determinar el rendimiento de la caldera y del horno. Una vez conocido el rendimiento global calcularemos la tasa de vapor, es decir, las toneladas de vapor producido por tonelada de residuos sólidos incinerados.

Un balance térmico riguroso conduciría a contabilizar todas las cantidades de calor que entran y salen de la instalación, a partir de un nivel de referencia, y en particular todos los calores sensibles (aire, gases, etc.), además del calor desprendido en la combustión. La práctica aconseja que se actuara tomando como nivel de referencia la temperatura ambiente. Por esto, las cantidades de calor que entran en la instalación se reducen al calor contenido en los residuos y, eventualmente, al calor contenido en el agua de alimentación de las calderas cuando este agua está recalentada.

La cantidad de calor contenida en el vapor la calcularemos por diferencia entre las cantidades de calor que entran en la instalación y las pérdidas de calor habidas en la misma, tomando como base 1 Ton. de residuos sólidos.

E. Cantidad de calor que entra en la instalación:

E.1. Calor contenido en los residuos

$$\text{Valor} = \text{masa de los residuos} \times \text{PCI}$$

$$QE1 = 1.000 \text{ Kg.} \times 4.500 \text{ kcal/Kg} = 4.500.000 \text{ kcal/kg}$$

E.2. Calor contenido en el agua de alimentación a la entrada de las calderas. No se considera por no existir recalentamiento.

S. Cantidades de calor que salen de la instalación:

S.1. Calor contenido en el vapor producido

*Valor = masa del vapor producido x entalpía del vapor.
En nuestro caso, será la incógnita a determinar.*

S.2. Calor sensible de los humos a la temperatura T_f

El calor, transportado por los humos será:

$$QS2 = \text{masa de los humos} \times \text{calor másico} \times (T_f - T_a)$$

*siendo: T_f = la temperatura de los humos (275°C)
 T_a = la temperatura del aire ambiente (25°C)*

El calor másico de los humos lo hemos determinado a partir de las proporciones de sus principales elementos constituyentes: CO_2 , N_2 y vapor de H_2O .

Así, hemos obtenido:

$$\text{Calor másico} = 0,501 \times 0,16 + 0,318 \times 0,66 + 0,383 \times 0,18 = 0,359 \text{ kcal/kg}$$

$$QS2 = 9 \text{ Nm}^3/\text{Kg.} \times 1.000 \text{ Kg.} \times 0,359 \text{ kcal/Nm}^3\text{°C} \times (275-25)\text{°C} = 771.750 \text{ kcal}$$

S.3. Calor sensible de las escorias y cenizas.

$$QS3 = \text{masa de las escorias} \times \text{calor másico} \times (T_m - T_a)$$

*siendo: T_m : la temperatura de las escorias, 700°C;
 T_a : la temperatura del aire ambiente, 25°C.*

El calor másico de las escorias lo tomaremos igual a 0,2 kcal/Kg °C. La masa de las escorias y cenizas, según los resultados obtenidos del laboratorio, fueron:

<i>escorias</i>	<i>25% en peso del combustible;</i>
<i>cenizas</i>	<i>15% “ “ “ “</i>

$$\text{Por tanto: } QS3 = 400 \text{ Kg.} \times 0,2 \text{ kcal/Kg.°C} \times (700-25)\text{°C} = 54.000 \text{ kcal}$$

Se ha considerado que las escorias y las cenizas tienen el mismo calor másico, y que la temperatura de los humos portadores de las cenizas en suspensión, es de 700°C, la misma que la de las escorias.

S. 4. Calor contenido en el material sin incinerar

Se considera que el material sin incinerar supone un 5% en peso del total de las escorias, y que está compuesto principalmente por inquemados de carbono cuyo poder calorífico puede tomarse igual a 8.000 kcal/Kg.

Por tanto, el calor contenido en los inquemados de carbono será:

$$QS4 = 12,5 \text{ Kg.} \times 8.000 \text{ kcal/Kg} = 100.000 \text{ kcal}$$

S.5. Calor sensible del agua eliminada con las escorias.

Se trata del agua que sirve para el apagado de las escorias y se elimina con éstas. Si se designa por T_e la temperatura de este agua a su entrada en el dispositivo de extracción (25°C), Y por T_m la temperatura de las escorias (700°C), el calor sensible transportado por esta agua es igual a:

$$QS5 = \text{masa de agua} \times (T_m - T_e) = 25 \text{ Kg.} \times 1 \text{ kcal/Kg.}^\circ\text{C} \times (700-25)^\circ\text{C} = 16.875 \text{ kcal}$$

estableciendo que este agua supone el 10% de las escorias en peso.

S.6. Calor perdido por radiación a través de las paredes horno-caldera

Este calor no puede medirse en la práctica. Se estima en función de las características de la instalación. Nosotros lo consideraremos equivalente a un 2% de total, es decir:

$$QS6 = 0,02 \times 4.500.000 \text{ kcal} = 90.000 \text{ kcal}$$

Resultado del balance térmico:

La expresión del balance consiste en escribir que la suma de las cantidades de calor que entran es igual a la suma de las cantidades de calor que salen, o sea:

$$QE1 = \sum QS$$

La cantidad de calor contenida en el vapor se obtiene por diferencia, es decir:

$$\begin{aligned}
 QS1 &= QE1 - (QS2 + QS3 + \dots + QS6) \\
 &= 4.500.000 - (771.750 + 54.000 + 100.000 + 16.875 + 90.000) = \\
 &= 4.500.000 - 1.032.625 = 3.467.375 \text{ kcal}
 \end{aligned}$$

Valores de las pérdidas obtenidas:

Toda cantidad de calor que sale de la instalación y no está contenida en el vapor recuperado la hemos considerado como una pérdida. Si los resultados anteriores lo traducimos a porcentajes, obtendremos:

	<u>Porcentaje</u>
- pérdidas por calor sensible de los humos	17,15%
- pérdidas por inquemados de carbono	1,2%
- pérdidas por calor sensible de las escorias	2,2%
- pérdidas por calor sensible del agua de las esc.	0,375%
- pérdidas por radiación	2%
PERDIDAS TOTALES	22,925%

1.8.6. Rendimiento del grupo horno-caldera:

Es la relación entre la cantidad de calor suministrado al agua en la caldera para su transformación en vapor y la cantidad de calor que entra en el horno como resultado de la incineración de los residuos,

$$R = \frac{(Q - q) \cdot AH}{(Q - q) \cdot AH + P}$$

siendo: AH = entalpía del vapor producido
 Q = caudal de vapor
 q = caudal de vapor que entra en el recalentador eventual de aire.
 P = pérdidas totales

En ausencia de recalentador de aire mediante: vapor, la expresión del rendimiento se convierte en :

$$R = \frac{Q \cdot H}{Q \cdot H + P} = \frac{3.467.375}{3.467.375 + 1.032.625} \times 100 = 77\%$$

Parámetro representativo del conjunto horno-caldera.

- Tasa de producción de vapor

En la mayoría de las veces, solo se obtiene el rendimiento del grupo horno-caldera, por considerarlo forman parte de un mismo conjunto como se ha procedido en el caso que nos ocupa. Siendo esta determinación el resultado de medidas largas y delicadas, el criterio de explotación corrientemente utilizado es la tasa de vaporización que, por definición, es la relación entre la cantidad de vapor producido y la cantidad de residuos quemados durante el mismo tiempo.

$$T = \frac{Q}{M} \quad \text{siendo:} \quad \begin{array}{l} Q = \text{la cantidad de vapor producido;} \\ M = \text{la masa de los residuos.} \end{array}$$

$$\text{Se tiene por tanto:} \quad M \times \text{PCI} = Q \times \text{AH} + P \quad \text{de donde:} \quad Q = \frac{M \cdot \text{PCI} - P}{\text{AH}}$$

$$T = \frac{Q}{M} = \frac{M \cdot \text{PCI} - P}{\text{AH} \cdot M} = \frac{1}{\text{AH}} \cdot \text{PCI} \cdot \left(1 - \frac{P}{M \cdot \text{PCI}}\right)$$

Observando que:

$$1 - \frac{P}{M \cdot \text{PCI}} = R \text{ (rendimiento)}$$

se obtiene:

$$\boxed{T = \frac{1}{\text{AH}} \cdot R \cdot \text{PCI}}$$

En esta forma, se ve que la tasa de vaporización depende evidentemente, en igualdad de condiciones, del PCI de los residuos, que es un factor independiente de la instalación.

De los dos primeros factores, que se refieren a la instalación, el factor $1/\text{AH}$ es una constante de ésta y depende de las características adoptadas para el agua y el vapor. Por ello, este factor puede variar de una instalación a otra.

En cuanto al factor R (rendimiento del conjunto horno-caldera), varía con el tiempo en una instalación determinada, debido al engrasamiento de la caldera y si disponemos sistemas de recuperación de calor.

Si en nuestro caso, consideramos una masa de 1Tn de residuos con un PCI de 4.500 Kcal./h., un rendimiento del grupo horno-caldera del 0,77 y suponemos que el vapor producido es saturado a la temperatura de 200°C y 15,85 Kg/cm² de presión, y que el condensado retorna a una temperatura de 140°C y 3,68 Kg/cm², resultará:

Observando las tablas de entalpía de vapor conseguimos: $AH = 667 - 140 = 527 \text{ Kcal/Kg.}$

$$T = \frac{1000}{527} \cdot 0,77 \cdot 4500 = 6.574,9kg$$

Es decir, con una Tn. de residuos obtenemos 6.574,9Tn. de vapor en las condiciones arriba indicada.