

6 MEMORIA DE CÁLCULO

Para realizar los cálculos de este proyecto se ha considerado que la incineradora recibe los residuos de una ciudad de, aproximadamente, 130.000 habitantes, con una producción media de 1,3 kg de residuos por habitante y día. Con lo que resulta un caudal de 7 t/h de residuos sólidos urbanos. La composición de dichos residuos se presenta en la siguiente tabla:

7 t/h	% mat org	% papel	% plástico	% vidrio	% metales	% otros	% humedad
Composición	44,0	21,0	19,0	7,0	3,5	5,5	40,0
% C	49,06	44,00	78,00			20	
% H	6,62	6,15	9,00			5	
% O	37,55	41,65	13,00			20	
% S	0,20	0,12				5	
% N	1,68	0,42					
% inertes	5,06	7,65		100	100	50	

Al tratar los datos se obtiene una composición elemental del residuo:

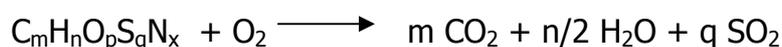
% C	% H	% O	% S	% N	% inertes
46,75	6,19	28,84	0,11	1,10	17,08

El poder calorífico del residuo se ha calculado mediante la fórmula de Dulong:

$$PC \text{ (kcal/kg)} = 80,56 * C + 339 (H - 1/8 O) + 22,5 * S + 5,6 * N$$

Sustituyendo la composición elemental obtenida, se obtiene un poder calorífico de 2.314 kcal/kg, considerando residuo húmedo y con inertes.

Dada una composición de residuo, la reacción de combustión en el horno puede escribirse de la siguiente manera:



Se desprecian las pequeñas cantidades que pudieran formarse de NO mediante esta reacción, el NO formado es prácticamente en su totalidad según el mecanismo de NO térmico y no del combustible.

Según la composición elemental del residuo se obtiene:

m	n	p	q	X
3,90	6,19	1,80	0,004	0,08

Y el peso molecular del mismo resulta:

$$PM \text{ (kg/kmol)} = 3,804 \cdot 12 + 2,957 \cdot 2 + 0,867 \cdot 32 + 0,004 \cdot 32 + 0,030 \cdot 28 = 80,2 \text{ kg/kmol}$$

Al ajustar la reacción, se obtiene que se necesitan 4,5 moles de oxígeno por mol de residuo para la combustión.

A continuación se calcula el aire de combustión estequiométrico:

Oxígeno teórico:

$$4,2 \text{ t residuo seco/h} \cdot 10^3 \text{ kg/t} \cdot \frac{1 \text{ kmol residuo}}{100 \text{ kg}} \cdot \frac{4,545 \text{ kmol O}_2}{\text{kmol residuo}} \cdot \frac{22,4 \text{ Nm}^3}{\text{kmol O}_2} = 4.276 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 / \text{h}$$

Aire teórico: aplicando el 21% de oxígeno en aire, se tiene:

$$4.276 \text{ Nm}^3/\text{h de O}_2 \cdot 100/21 = 20.362 \text{ Nm}^3/\text{h de aire estequiométrico}$$

Se va a aplicar un exceso de aire del 80%, así pues la cantidad de aire real a introducir en el horno es:

$$20.362 \text{ Nm}^3/\text{h de aire estequiométrico} \cdot (1 + \text{exc}/100) = 36.652 \text{ Nm}^3/\text{h de aire}$$

El caudal de residuo seco se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{t/h residuo seco} = \text{t/h residuo} \cdot (1 - \text{humedad}/100) = 7 \cdot (1 - 40/100) = 4,2 \text{ t/h}$$

Con lo que entran 2,8 t/h de agua con el residuo, que se evaporarán en el horno consumiendo energía, haciendo el cambio de unidades, resultan 3.484 Nm³/h de vapor de agua.

6.1 GASES GENERADOS

Según la ecuación que describe la reacción química de combustión en el horno, se forman dióxido de carbono, dióxido de azufre y vapor de agua, en sus respectivas relaciones estequiométricas. Mediante un balance se calculan las cantidades generadas de dichos gases.

CO₂:

$$4,2 \text{tresiduo sec o} / h \cdot 10^3 \text{ kg} / t \cdot \frac{1 \text{ kmolresiduo}}{100 \text{ kgresiduo}} \cdot \frac{3,804 \text{ kmolCO}_2}{1 \text{ kmolresiduo sec o}} \cdot \frac{22,4 \text{ Nm}^3}{1 \text{ kmolCO}_2} = 3,665 \text{ Nm}^3 \text{CO}_2 / h$$

SO₂:

$$4,2 \text{tresiduo sec o} / h \cdot 10^3 \text{ kg} / t \cdot \frac{1 \text{ kmolresiduo}}{100 \text{ kgresiduo}} \cdot \frac{0,004 \text{ kmolSO}_2}{1 \text{ kmolresiduo sec o}} \cdot \frac{22,4 \text{ Nm}^3}{1 \text{ kmolSO}_2} = 3,3 \text{ Nm}^3 \text{SO}_2 / h$$

H₂O:

$$4,2 \text{tresiduo sec o} / h \cdot 10^3 \text{ kg} / t \cdot \frac{1 \text{ kmolresiduo}}{100 \text{ kgresiduo}} \cdot \frac{1,478 \text{ kmolH}_2\text{O}}{1 \text{ kmolresiduo sec o}} \cdot \frac{22,4 \text{ Nm}^3}{1 \text{ kmolH}_2\text{O}} = 2,911 \text{ Nm}^3 \text{H}_2\text{O} / h$$

Para determinar el volumen total de gases, a la cantidad de gases generados hay que sumarle el agua que entró con los residuos y se ha evaporado, el nitrógeno que acompaña al aire introducido en el horno y el oxígeno que no reaccionó.

Total gases = CO₂ formado + SO₂ formado + H₂O formada + H₂O evaporada que entró con el residuo + aire que no ha reaccionado

Aire que no ha reaccionado = aire que entró – oxígeno que ha reaccionado (estequiométrico) = nitrógeno que entró + oxígeno que no ha reaccionado

Aire que no ha reaccionado = $36.652 - 4.276 = 32.376 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Total gases = $3.665 + 3,3 + 2.911 + 3.484 + 32.376 = 42.440 \text{ Nm}^3/\text{h}$ gases

6.2 NO_x PRODUCIDOS

Las condiciones en las que opera una planta incineradora de residuos están fijadas por la legislación (temperatura, concentración de oxígeno y tiempo de residencia), con lo cual la cantidad de óxidos de nitrógenos formados en la cámara de post-combustión son conocidos. Las concentraciones de NO_x medidas están, normalmente, en el rango de 100 a 400 mg/Nm³, siendo el rango de valores más típico de 200 a 400 mg/Nm³, referidos a condiciones normales, al 11% de oxígeno y gas seco, expresados como NO₂. Para este proyecto se ha seleccionado el valor más desfavorable, 400 mg/Nm³. Se ha proyectado reducir el 62,5 % de estos contaminantes, aunque el límite legislativo es de 200 mg/Nm³, en igual condiciones, 11 % de oxígeno y gas seco, se ha proyectado reducir la emisión hasta 150 mg/Nm³, manteniendo así un margen de seguridad. A continuación se presentan los cálculos realizados para calcular la cantidad de NO formada.

En primer lugar hay que referir la cantidad de NO a las condiciones reales que se tienen: gas húmedo y % de oxígeno de emisión.

$$400 \text{ mg} / \text{Nm}^3 \cdot \frac{(20,9 - 8,05)}{(20,9 - 11)} \cdot \left(1 - \frac{15,07}{100}\right) = 440 \text{ mg} / \text{Nm}^3$$

$$440 \text{ mg} / \text{Nm}^3 \cdot 42.440 \text{ Nm}^3 \text{ gases} / \text{h} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{46 \text{ kg}} \cdot \frac{22,4 \text{ Nm}^3}{1 \text{ kmol}} = 9,1 \text{ Nm}^3 \text{ NO} / \text{h} = 406,5 \text{ mol NO} / \text{h}$$

6.3 NH₃ NECESARIO

La cantidad de amoniaco necesaria se calcula según la cantidad de NO formado y la relación estequiométrica proporcionada por la reacción de reducción:



Se puede observar que la relación entre amoniaco y oxido de nitrógeno es 1:1, es decir, teóricamente, por cada mol de NO que se quiere eliminar se necesita un mol de amoniaco, aunque realmente habrá que introducir más de un mol de amoniaco para reducir un mol de NO.

De los NO producidos se va a reducir el 62,5 %, con lo que van a reaccionar:

$$406,5 \text{ kmol NO/h} \cdot 0,625 = 254 \text{ mol NO/h}$$

Ya que la relación estequiométrica es 1:1, la cantidad teórica de amoniaco necesaria sería 254 mol NH₃/h.

$$254 \text{ mol NH}_3 / \text{h} \cdot \frac{17 \text{ kg NH}_3}{10^3 \text{ mol NH}_3} = 4,32 \text{ kg NH}_3 / \text{h}$$

El amoniaco se aporta en forma de solución acuosa al 25 %, con lo que resulta:

$$4,32 \text{ kg NH}_3 / \text{h} \cdot \frac{100 \text{ kg solución}}{25 \text{ kg NH}_3} = 17,3 \text{ kg solución} / \text{h} \cdot 0,9 \text{ kg} / \text{L solución} = 19,2 \text{ L solución} / \text{h}$$

Esta es la cantidad teórica que hay que inyectar pero realmente se necesita más. Ahora hay que ver cuanto inyectar para asegurar la reducción del 62,5 % de los NO, pero teniendo en cuenta que el amoniaco es un producto

tóxico y corrosivo, y aunque la cantidad de amoniaco en los gases de salida por chimenea no está limitada por la legislación, el documento BREF de plantas incineradoras de residuos da una cantidad de referencia de 10 mg de NH_3/Nm^3 de gas, en condiciones normales, al 11 % de oxígeno y gas seco.

La cantidad de solución de amoniaco aportado por mol de NO no controlado, denominada NSR (normalized stoichiometric ratio) toma unos valores entre 0,6 y 2, según bibliografía consultada.

En la siguiente figura se puede observar que para un valor de NSR, aproximadamente, igual a 1 se consigue reducir el % de NO proyectado. Por tanto ese es el valor que se toma para calcular la cantidad real de solución de amoniaco a inyectar.

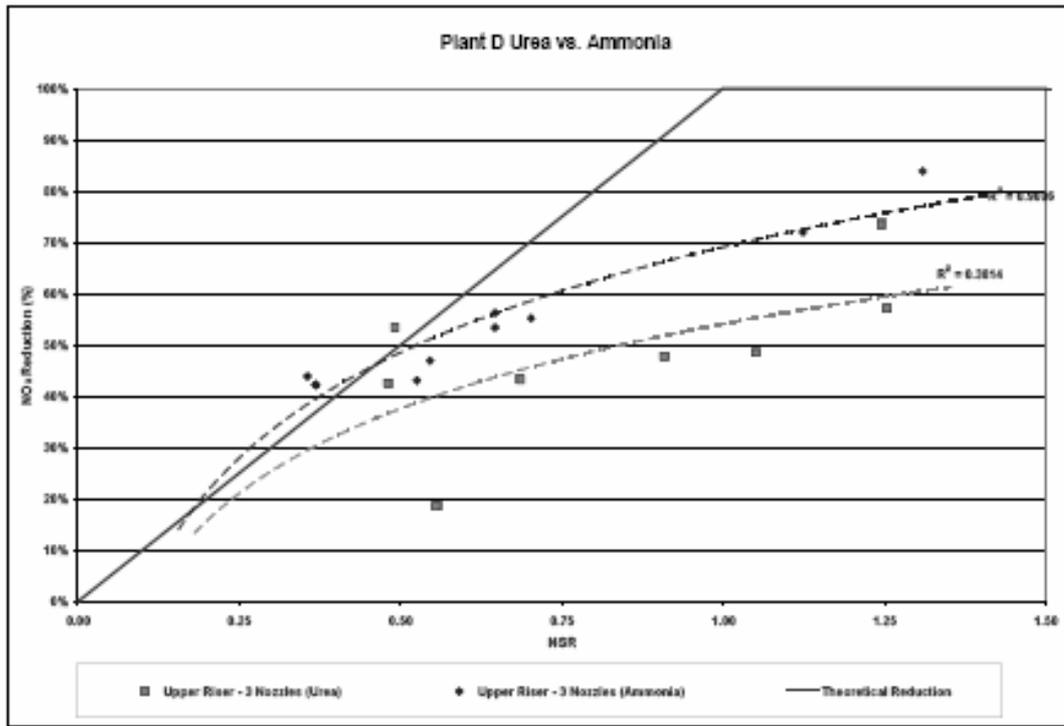
Un valor de NSR igual a 1, se traduce en introducir un mol de amoniaco por cada mol de NO que se forma, ya se vio que la cantidad formada era de 406,5 mol/h. así pues esa misma se debe introducir de amoniaco.

$$406,5 \text{ mol NH}_3 / \text{h} \cdot \frac{17 \text{ kg NH}_3}{10^3 \text{ mol NH}_3} = 6,9 \text{ kg NH}_3 / \text{h}$$

$$6,9 \text{ kg NH}_3 / \text{h} \cdot \frac{100 \text{ kg solución}}{25 \text{ kg NH}_3} = 27,6 \text{ kg / h solución} \cdot \frac{1 \text{ L solución}}{0,9 \text{ kg solución}} = 30,7 \text{ L solución / h}$$

$$30,7 \text{ L solución / h} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^3 \text{ L}} = 22,1 \text{ m}^3 / \text{mes}$$

Resulta un consumo de unos 22 m³/mes.



6.4 ALMACENAMIENTO

Para calcular el almacenamiento de amoniaco se ha tenido en cuenta el consumo de solución de amoniaco y la capacidad de los camiones cisterna que transportan la solución hasta la planta.

En los cálculos anteriores se ha determinado que se necesitan 22 m³/mes de reactivo, con lo cual la capacidad del tanque debe ser superior. Los camiones cisterna transportan, aproximadamente, 20 toneladas de producto, que por la densidad son unos 22 m³. Se necesita, por tanto, un camión al mes para cubrir las necesidades.

En el capítulo de diseño se especifican las características que debe tener un almacenamiento de este tipo y sus dimensiones.

6.5 NUMERO DE LANZAS

En este proyecto se van a emplear lanzas de una boquilla, del tipo twin fluid, dos fluidos que se mezclan, el líquido reactivo y el agente pulverizador. En este caso la solución de amoníaco y aire comprimido.

El número de lanzas a incluir viene determinado por la relación entre el caudal de solución de amoníaco que hay que inyectar y el caudal que proporciona cada boquilla, también por el alcance del inyector, ya que se tiene que garantizar que el reactivo se pulverice en toda la zona alta del horno para asegurar la mezcla y reacción con los óxidos de nitrógeno.

Las boquillas se distribuyen en varios niveles en la zona convectiva, que es donde da una temperatura óptima para la reacción de reducción. El primer y segundo nivel son los que aportan el reactivo necesario, estando el tercer nivel en reserva para operar en caso de que queden fuera de servicio otras boquillas debido a obstrucciones u otros motivos.

En cada nivel se van a colocar 4 boquillas, en total son 12, pero en condiciones normales funcionan 8, correspondientes a los dos primeros niveles, por tanto, cada una de ellas tiene que aportar un caudal de 0,06 L/min.

6.6 CANTIDAD AIRE/VAPOR

El amoniaco es inyectado en la cámara de combustión acompañado de aire o vapor, que es el agente pulverizador, de manera que la cantidad de aire introducido viene fijado por el modelo de lanza seleccionado. En este caso se utiliza vapor, ya que se genera en la propia planta.

Para el modelo elegido se necesita un aporte de vapor de 10,76 L/min a una presión manométrica de 0,7 bars.

En el siguiente capítulo se especifica el atomizador seleccionado y sus características técnicas, se incluye el catálogo como anexo.

6.7 BOMBAS

Las bombas son las encargadas de suministrar la solución de reactivo a las lanzas de inyección, a la presión adecuada para que sea pulverizada y se mezcle con los gases de combustión permitiendo así la reacción entre amoníaco y NO.

Se van a colocar dos bombas, una de ellas en reserva para el caso de fallo de la bomba principal. Ésta tiene que aportar la altura necesaria para que el fluido llegue a la boquilla con la presión requerida, después de salvar las pérdidas de carga originadas por distintos elementos como válvulas, codos, etc.

Los datos de partida para el cálculo de la bomba necesaria son caudal que tiene que aportar y la presión requerida en la boquilla. Se necesita un caudal de solución de amoníaco de 30,7 L/h, aunque se va a poner un margen de manera que la bomba sea capaz de impulsar 40 L/h. Según el modelo de boquilla seleccionado, la presión requerida en el punto de inyección es igual a 2,8 bars.

En primer lugar se plantea un balance de energía mecánica entre el tanque (A) y el punto de inyección (B):

$$\frac{P_A}{\rho} + g \cdot z_A + \frac{u_A^2}{2} + \Delta H_{bomba} = \frac{P_B}{\rho} + g \cdot z_B + \frac{u_B^2}{2} + h_{fAB}$$

Despejando la altura de la bomba queda:

$$\Delta H_{bomba} = \frac{P_B - P_A}{\rho} + g \cdot (z_B - z_A) + \frac{u_B^2 - u_A^2}{2} + h_{fAB}$$

La velocidad del fluido en la superficie del tanque se puede despreciar.

$$\Delta H_{bomba} = \frac{P_B - P_A}{\rho} + g \cdot (z_B - z_A) + \frac{u_B^2}{2} + h_{fAB}$$

Datos de diseño:

$P_B = 2,8$ bars, presión requerida por la boquilla.

$P_A =$ presión de vapor del amoniaco = $0,75$ atm.

$Z_B = 25$ m. altura a la que se sitúan las lanzas de inyección en el horno.

$Z_A = 0,5$ m, el tanque tiene una altura de 5 m, pero se va a considerar una altura desfavorable, caso en el que el tanque está casi vacío.

$$u_B = \frac{Q_B}{A}$$

Q_B : caudal de solución de amoniaco en el punto B.

A: sección de la tubería.

Ahora queda calcular las pérdidas de carga de los elementos presentes en las tuberías. El término de pérdida de carga se expresa como:

$$h_{AB} = 4 \cdot f \cdot \frac{(L_{equiv} + L) \cdot u^2}{D \cdot 2}$$

$$h_{AB} = 4 \cdot f \cdot (1 + k) \cdot \frac{L \cdot u^2}{D \cdot 2}$$

Hay dos expresiones de cálculo para las pérdidas de carga en tuberías, ya que las pérdidas de cada elemento se pueden expresar como un coeficiente k o como longitud equivalente L_{equiv} (longitud de tubería con igual pérdida de energía mecánica), en este caso se van a emplear longitudes equivalentes.

Los elementos que hay en las tuberías y sus pérdidas de carga en términos de longitudes equivalentes son:

Codos: $0,4$ m

Válvulas de asiento o de globo: 5 m

Válvulas de bola: 10 m

Contracciones de diámetro: 0,3 m

Expansiones: 0,18 m

El coeficiente f se determina gráficamente usando el Ábaco de Moody, hay que calcular el Reynolds y la rugosidad relativa.

Rugosidad relativa, para aceros comerciales: $\frac{\varepsilon}{D} = 0,003$

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = 371$$

El número de Reynolds es muy pequeño, el fluido circula en régimen laminar, entonces el coeficiente f se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{64}{\text{Re}} = 0,17$$

Ahora ya se puede calcular el término de pérdida de carga:

$$h_{AB} = f \cdot \frac{(L_{\text{equiv}} + L)}{D} \cdot \frac{u^2}{2} = 54 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Sustituyendo en la ecuación de cálculo de la altura de la bomba:

$$\Delta H_{\text{bomba}} = \frac{276}{900} \cdot 10^3 + 9,8 \cdot (25) + \frac{0,13^2}{2} + 54 = 606 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

En unidades de presión:

$$606 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot 900 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \frac{1 \text{ bar}}{10^5 \text{ Pa}} = 5,5 \text{ bars}$$

Por tanto se necesita una bomba que proporcione, como mínimo, un caudal de 30,7 L/h a 5,5 bars de presión.