

ANEXO 5. DISEÑO DEL SEPARADOR CICLÓNICO

La corriente de gases de salida del desorbedor es conducida a un separador ciclónico, comúnmente denominado ciclón. Se dispone justamente después del horno rotativo en el tren de tratamiento, para una primera captación de las partículas arrastradas durante la desorción de los contaminantes, ya que este tipo de equipos se emplean generalmente donde no se requiere una alta eficacia de captación y el tamaño de partícula es relativamente grande ($D > 5 \mu\text{m}$), usándose de este modo como preseparator (la separación completa se lleva a cabo posteriormente en el filtro de mangas).

Pueden construirse en multitud de materiales diferentes por lo que son aptos para operar bajo condiciones severas de erosión y corrosión. Además, son relativamente baratos y al no tener partes móviles el mantenimiento es sencillo y poco costoso.

Para el diseño se considera un ciclón de proporciones estándar como el representado en la fig A.5.1, donde:

$$B_C = D_C / 4$$

$$D_E = D_C / 2$$

$$H_C = D_C / 2$$

$$L_C = 2 \cdot D_C$$

$$S_C = D_C / 8$$

$$Z_C = 2 \cdot D_C$$

$$J_C = D_C / 4$$

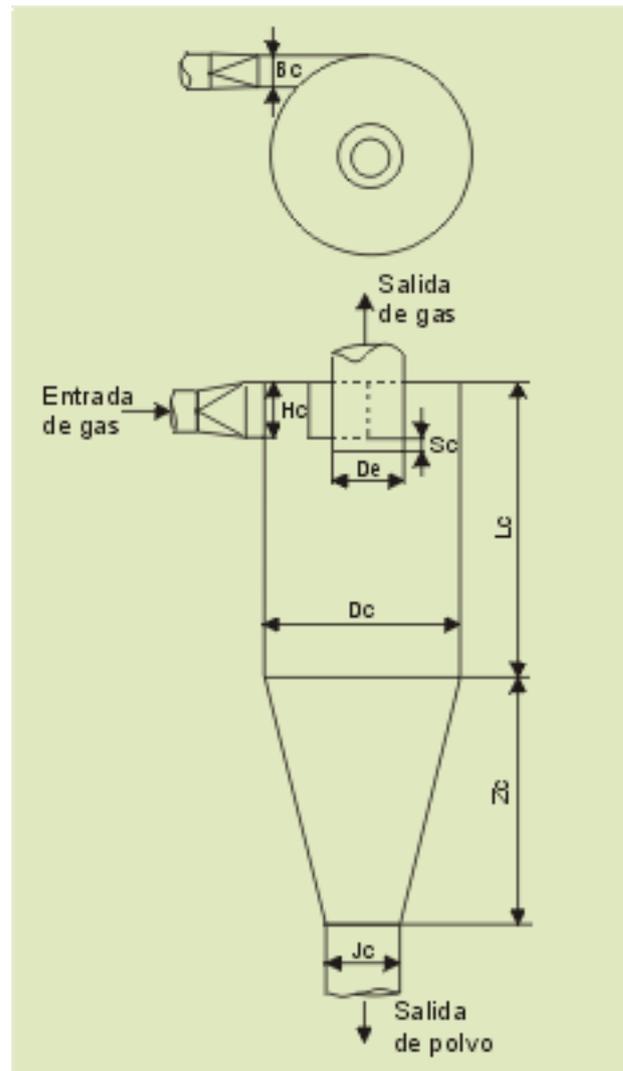


Fig. A.5.1

Se detallan a continuación los datos de los que se dispone y los cálculos llevados a cabo para el diseño del equipo:

1. Caudal de gas de entrada en el ciclón : Este caudal, denominado $m_{g,\text{total}}$ (en kg/h) para distinguirlo del m_g calculado en el diseño del desorbedor, es la suma de todo el caudal gaseoso que sale por la parte superior del desorbedor en dirección al ciclón, es decir, es la suma de m_g (caudal másico de entrada de gases en el desorbedor, formados en la cámara de combustión del quemador auxiliar, y que salen del mismo por la parte superior de salida), m_{v_0} (caudal másico de entrada de vapor de agua en el desorbedor, formado en la reacción química producida en la cámara de combustión del quemador auxiliar, y que sale del mismo por la parte superior de salida) y de m_{ev} (caudal másico de agua presente en el sólido que se evapora en el desorbedor, pasando a la fase gaseosa). Todos estos valores ya fueron calculados en el diseño del desorbedor (Anexo 3).

El caudal de contaminantes (hidrocarburos) desorbidos (m_{HC}) en el horno rotativo se comprueba a continuación que a efectos de cálculo es despreciable en comparación con el resto de caudales implicados, sin embargo se tendrá también en cuenta.

La proporción total de contaminantes en el suelo es de 352 mg/kg de suelo seco, el caudal de material sólido seco de entrada al desorbedor es de 9500 kg/h, por tanto:

$$m_{HC} = 352 \cdot 9500 / 10^6 = 3,34 \text{ (kg/h)}.$$

Se tiene de esta forma que:

$$m_{g,\text{total}} = m_g + m_{vo} + m_{ev} + m_{HC} = 7670,90 + 541,12 + 902,5 + 3,34 = 9117,87 \text{ (kg/h)}.$$

2. Caudal de partículas arrastradas durante el proceso de desorción (m_p en kg/h). Como caso desfavorable, se considera un 10 % del caudal de material sólido de entrada en el desorbedor, por tanto se tiene que:

$$m_p = 0,1 \cdot m_s = 0,1 \cdot 9500 = 950 \text{ (kg/h)}.$$

3. Densidad y viscosidad del gas a la temperatura de salida ($T_{G1} = 390 \text{ }^\circ\text{C}$). Como buena aproximación se pueden tomar los valores correspondientes al aire seco a dicha temperatura, sin embargo, se realiza una media ponderada de todos los componentes presentes (aire, vapor de agua y anhídrido carbónico). Se tiene que:

$$m_{CO_2} = 2,46 \cdot 294,64 = 732,45 \text{ (kg/h)}.$$

$$m_{\text{aire}} = m_g - m_{CO_2} = 6828,36 \text{ (kg/h)}.$$

$$m_{\text{vapor agua}} = m_{vo} + m_{ev} = 1435,22 \text{ (kg/h)}.$$

$$m_{g,\text{total}} \text{ (exceptuando HC desorbidos)} = 732,45 + 6828,36 + 1435,22 = 8987,03 \text{ (kg/h)}.$$

Por tanto, las fracciones correspondientes a cada uno de los componentes presentes son:

$$x_{CO_2} = 732,45 / 8987,03 = 0,080$$

$$x_{\text{aire}} = 6828,36 / 8987,03 = 0,760$$

$$x_{\text{vapor agua}} = 1443,62 / 8987,03 = 0,160$$

Las correspondientes densidades y viscosidades de los componentes mayoritarios presentes a la temperatura de 390 °C son:

- Para aire seco : $\rho_{\text{aire,seco}} = 0,5323 \text{ (kg/m}^3\text{)}$; $\mu_{\text{aire seco}} = 32,29 \cdot 10^{-6} \text{ (kg/m}\cdot\text{s)}$.
- Para CO₂ : $\rho_{\text{CO}_2} = 0,8096 \text{ (kg/m}^3\text{)}$; $\mu_{\text{CO}_2} = 303,52 \cdot 10^{-7} \text{ (kg/m}\cdot\text{s)}$.
- Para H₂O_(v) : $\rho_{\text{vapor agua}} = 0,3319 \text{ (kg/m}^3\text{)}$; $\mu_{\text{vapor agua}} = 240,34 \cdot 10^{-7} \text{ (kg/m}\cdot\text{s)}$.

Se tiene entonces que:

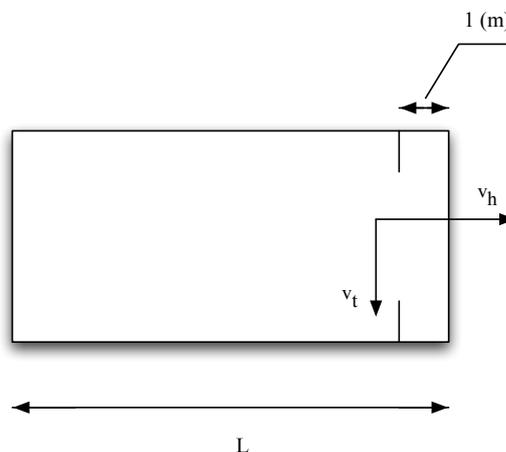
$$\rho_{\text{gas}} = 0,761 \cdot 0,5323 + 0,081 \cdot 0,8096 + 0,158 \cdot 0,3319 = 0,5229 \text{ (kg/m}^3\text{)}.$$

$$\mu_{\text{gas}} = 32,29 \cdot 10^{-6} \cdot 0,761 + 303,52 \cdot 10^{-7} \cdot 0,081 + 240,34 \cdot 10^{-7} \cdot 0,158 = 308,26 \cdot 10^{-7} \text{ (kg/m}\cdot\text{s)}.$$

De este modo se puede calcular el caudal de gas a tratar (Q_G):

$$Q_G \text{ (m}^3 \text{/s)} = \frac{m_g \text{ (kg/h)}}{\rho_g \text{ (kg/m}^3\text{)}} \cdot \frac{1}{3600} = 4,777 \text{ (m}^3 \text{/s)}$$

4. Distribución granulométrica de las partículas de salida del desorbedor que llegan al ciclón. Para ello se determina el diámetro máximo de partícula ($d_{p,\text{máx}}$) que es arrastrado fuera del mismo, es decir, el tamaño de partícula máximo para el cual es arrastrada fuera del desorbedor, de forma que todas las partículas con un diámetro menor o igual serán arrastradas por la corriente de gases. El caso más desfavorable de arrastre por los gases es el de partículas que caen verticalmente desde las últimas aspas del horno. Se considera una altura de caída de aproximadamente $H = 2$ (m) y se supone que las últimas aspas están situadas a una distancia de la salida de 1 (m). Se representa a continuación un pequeño esquema para poder apreciarlo mejor:



donde,

- v_h es la velocidad horizontal en m/s. Para el caso esta velocidad coincide con la velocidad de los gases a la salida del desorbedor, es decir, a una temperatura de $T_{G1} = 390$ °C. Esta velocidad se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Q_G (m^3/s) = v_{gas,salida} \cdot A_{desorbedor} = v_{gas,salida} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \Rightarrow v_h = v_{gas,salida} = \frac{4 \cdot Q_G}{\pi \cdot D^2} = 1,43 (m/s)$$

- v_t es la velocidad terminal de la partícula (en m/s). Mientras es arrastrada horizontalmente, la partícula cae por gravedad. Concretamente cae dos metros mientras es arrastrada un metro, por tanto la velocidad terminal de la partícula para que esta caiga antes de salir arrastrada fuera del desorbedor debe ser el doble de la de arrastre por el gas:

$$v_t (m/s) = 2 \cdot v_h = 2 \cdot 1,43 = 2,87 (m/s)$$

A partir de esta velocidad terminal se calcula el diámetro máximo de partícula, aunque antes hay que calcular el régimen en el cual se está produciendo el movimiento de las partículas en suspensión en el seno del gas, para ello se calcula el número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{\rho_{gas} \cdot D \cdot v_{gas,salida}}{\mu_{gas}} = 50077,272$$

Se encuentra por tanto en régimen de Newton, ya que $500 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$. En este caso para el cálculo del diámetro de partícula máxima se usa la siguiente expresión de velocidad terminal genérica:

$$v_t = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d_p \cdot (\rho_p - \rho_{gas})}{3 \cdot C_D \cdot \rho_{gas}}} \Rightarrow d_p = \frac{3 \cdot v_t^2 \cdot C_D \cdot \rho_{gas}}{4 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_{gas})}$$

donde,

- d_p es el diámetro de la partícula (en m).
- ρ_p es la densidad de la partícula (en kg/m^3). Se toma la densidad de limos y arcillas, ya que se presume que al tratarse de las partículas de menor tamaño, serán arrastradas en mayor proporción fuera del desorbedor por la corriente de gases. De esta forma, se tiene que $\rho_p = \rho_{arcilla\ seca} = 1800$ (kg/m^3).
- ρ_{gas} es la densidad del gas (calculada anteriormente). $\rho_{gas} = 0,5229$ (kg/m^3).

- g es la aceleración de la gravedad (en m/s^2). $g = 9,8 (m/s^2)$.
- μ_{gas} es la viscosidad del gas (calculada anteriormente). $\mu_{gas} = 308,26 \cdot 10^{-7} (kg/m \cdot s)$.
- C_D es el coeficiente de resistencia aerodinámico, el cual depende del número de Reynolds. Estos valores de C_D en función del Re se encuentran tabulados, y para un $Re = 49828,671$ se tiene un $C_D = 0,49$.

Por tanto, sustituyendo valores en la expresión anterior se tiene que:

$$d_{p,m\acute{a}x} = 89,53 \mu m$$

por lo que todas las partículas arrastradas fuera del desorbedor son limos y arcillas.

Se tiene entonces que:

- para un $d_p < 89,53 \mu m \rightarrow$ la partícula es arrastrada fuera del desorbedor en dirección al separador ciclónico.
- para un $d_p \geq 89,53 \mu m \rightarrow$ la partícula no es arrastrada fuera del desorbedor.

De este estudio se concluye que la distribución granulométrica queda de la siguiente forma:

tamaño de partículas (μm)	% peso
0,1 - 1	40
1 - 10	30
10 - 30	20
30 - 60	7
60 - 89,53	3

5. Se establece una pérdida de carga máxima admisible en el equipo (en mmca), y a partir de esta se calcula la velocidad del gas de entrada al mismo mediante la siguiente relación:

$$\Delta P(mmca) = 0,408 \cdot \rho_g (kg/m^3) \cdot v_g (m/s)$$

Imponiendo una pérdida de carga máxima admisible de 48 mmca, se obtiene, despejando de la ecuación anterior, una velocidad del gas de $v_g = 15 (m/s)$.

6. Con los datos del caudal volumétrico de gases a tratar por el equipo (Q_G) y la velocidad de circulación del gas en el mismo, se calcula el boce (B_C) de entrada al separador ciclónico. De esta forma, se tiene que:

$$Q_G(m^3/s) = v_g(m/s) \cdot A(m^2) = v_g \cdot \pi \cdot \frac{B_C^2}{4}$$

$$B_C = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_G}{v_g \cdot \pi}} = 0,64(m)$$

7. Se calcula el tamaño de partículas (en μm) captadas con una eficacia del 50 % (d_{pc}), mediante la siguiente expresión:

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu_{gas} \cdot (B_C/2)}{\pi \cdot N_t \cdot v_g \cdot \rho_p}} = 17 \mu m$$

donde,

N_t es el número de vueltas que da el gas en el vórtice exterior, valor que se obtiene haciendo uso de una gráfica normalizada donde se representa dicho número de vueltas en el eje de ordenadas frente a la velocidad del gas de entrada al ciclón (en ft/s) en el eje de abscisas.

Para una $v_g = 15$ (m/s) = 49,21 ft/s, se obtiene una $N_t = 3,6$.

8. Se calcula la eficacia global. Para ello se calculan en primer lugar las eficacias fraccionales (η_i) para cada tamaño de partícula (se toma un tamaño medio en cada rango dado anteriormente en la tabla de distribución granulométrica, por ejemplo en el primer rango de 0,1 a 1 μm se toma un valor de tamaño de partícula de $d_p = (0,1+1)/2 = 0,55$, e igual con el resto), estas eficacias se obtienen a partir de una gráfica normalizada donde se representan en el eje de ordenadas frente a la relación de tamaños d_p/d_{pc} en el eje de abscisas. Una vez calculadas, la eficacia global se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\eta_G = \sum x_i \cdot \eta_i = 26,3\%$$

Se obtiene un separador ciclónico necesario de diámetro de corte $D_C = 2,55$ (m) y que alcanza una eficacia global de captación de partículas en suspensión del 26,3 %.

A continuación se detallan las dimensiones correspondientes al separador ciclónico necesario:

$$B_C = 0,64 \text{ (m)}$$

$$D_C = 2,55 \text{ (m)}$$

$$D_e = 1,27 \text{ (m)}$$

$$H_C = 1,27 \text{ (m)}$$

$$L_C = 5,09 \text{ (m)}$$

$$S_C = 0,32 \text{ (m)}$$

$$Z_C = 5,09 \text{ (m)}$$

$$J_C = 0,64 \text{ (m)}$$