

ANEXO 8. DISEÑO DEL FILTRO DE MANGAS

A la salida del enfriador evaporativo el caudal de gases enfriado es conducido a un filtro de mangas. Este tipo de filtración a través de un tejido es probablemente el más antiguo, simple y eficaz procedimiento de separación de polvo de una corriente de gas. A escala industrial se emplea cuando las partículas a eliminar son de pequeño tamaño (como es el caso que concierne en el presente proyecto), se requiere una gran eficacia y es deseable recoger el polvo seco.

La operación consiste básicamente en forzar el paso de la corriente de gas a través del medio filtrante (tejido). El tejido produce un cierto efecto filtrante, aunque su principal misión consiste en servir de soporte para la capa de polvo (torta) que rápidamente se acumula sobre él. Capa de polvo que es la responsable de la alta eficacia de filtración de partículas de pequeño tamaño.

A medida que el filtro se carga de partículas exteriormente la pérdida de carga del gas a través del mismo va aumentando. Llegará por tanto un momento en el que, en parte por la limitación del ventilador, hay que parar y proceder a la limpieza del filtro con el objeto de comenzar un nuevo ciclo de filtración.

Las superficies filtrantes tienen forma de bolsa o mangas y generalmente, un filtro contiene varias celdas o compartimentos estancos cada uno conteniendo una serie de mangas. Así, mientras las mangas de una celda están en fase de limpieza o mantenimiento las demás pueden estar en servicio.

Las principales ventajas de los filtros de tejido son:

- Presentan altos rendimientos de depuración, incluso para partículas muy finas. Son valores usuales rendimientos del 99 % al 99,9 % para partículas con tamaños comprendidos en un rango muy amplio de tamaños, desde submicrónicas hasta de varios cientos de micras.
- Pueden operar con una amplia variedad de polvos, de distinta naturaleza y propiedades tanto físicas como químicas.
- Permiten un diseño y construcción modular, siendo así adaptables al tratamiento de caudales de gas muy distintos.

Por el contrario sus principales limitaciones son:

- Gran necesidad de espacio para su implantación.
- No pueden operar en ambientes húmedos o cerca del punto de rocío de la corriente gaseosa a tratar, pues existe el riesgo de colmatación de la tela al quedarse el polvo húmedo adherido a ellas tras la limpieza.
- No pueden depurar polvos adhesivos o aglomerantes por razones similares a la anterior.

Por otro lado, el parámetro de diseño más importante, ya que marca el tamaño del equipo dado un caudal de gas a tratar y, por tanto, el coste de inversión en una parte significativa, es el cociente entre el caudal real de gas y la superficie de captación, es decir, la superficie de la tela. A este cociente se le llama relación A/C, del inglés “Air to Cloth ratio”, expresado en m/s, y coincide con la velocidad de filtración, es decir, la velocidad promedio con la que el gas atraviesa la tela.

Principalmente, el coste de operación de estos equipos viene dado por el otro parámetro importante, la pérdida de carga total en el equipo, ya que este valor determina la necesidad energética de impulsión del gas a través del filtro.

En cuanto al tipo de filtro de mangas que se va usar en el tratamiento de captación atendiendo al método de limpieza empleado, es decir, la forma de comunicar a las mangas la energía suficiente para vencer la fuerzas de adhesión que mantienen el polvo en la tela, es un filtro de limpieza por pulsos de aire a presión (Pulse Jet Fabric Filter, PJFF).

En este tipo de filtros el gas circula a través de la tela desde fuera hacia dentro y el polvo queda retenido en la superficie exterior de la manga.

En la limpieza se usa aire comprimido para generar un pulso o disparo de aire que se libera en el interior de cada manga por su extremo superior y que la recorre en sentido descendente expandiéndola violentamente durante un período de tiempo muy corto. La manga alcanza su máxima extensión en dirección radial y la torta de polvo se libera por igual motivo, es decir, por adquirir una aceleración suficiente para vencer las fuerzas de adhesión entre la torta de polvo y la manga.

Para prevenir que las mangas se plieguen sobre sí mismas impidiendo el paso del gas durante la operación de filtración, estas van montadas sobre jaulas formadas por varillas metálicas (acero normalmente) que las mantienen cubiertas durante el funcionamiento del equipo.

Se sujetan la manga y la jaula por sus extremos superiores a una placa con orificios. La abertura superior de las mangas coincide con los orificios de la placa, de esta forma el gas “sucio” sólo puede atravesar radialmente las telas y pasar por los orificios de la placa a la zonas de gas “limpio”. El extremo inferior de las mangas no posee abertura en la tela.

No es necesario compartimentar los filtros, ya que este método de limpieza permite realizar la misma “on line” sin necesidad de dejar de filtrar, es decir, una manga puede limpiarse sin necesidad de aislarla del flujo de gas “sucio” a tratar. En efecto, el pulso de aire de limpieza generado por la apertura de una válvula de accionamiento rápido (apertura y cierre rápidos), se opone y es capaz de interrumpir el flujo de gas sucio en la manga sometida a limpieza, pero sólo durante décimas de segundo.

Las mangas se disponen en filas, siendo cada una de estas filas recorrida por una tubería de aire comprimido situada encima de la abertura superior de las mangas en la zona de gas “limpio”. En las tuberías de aire comprimido, justo sobre cada manga existe un orificio por el que se libera el pulso de aire a presión durante la limpieza. Cada conducto que suministra aire a una fila de mangas posee una válvula de apertura rápida, de esta forma la limpieza se realiza por filas, siendo normalmente limpiadas a la vez el 10 % del total de mangas del equipo.

En lo referente a la elección del medio filtrante, se selecciona una fibra tipo Aramidas. La fibra más usada de este tipo se comercializa bajo el nombre de Nómex. Son macromoléculas lineales sintéticas formadas por agrupaciones aromáticas unidas entre sí por grupos amida, de los que un mínimo del 85 % están unidos a anillos aromáticos y el 50 % pueden reemplazarse por grupos imida. Se usa con alta temperatura y soporta en continuo hasta 200 °C, y mantiene excelentes propiedades físicas y estabilidad dimensional. No se funde, pero se deteriora rápidamente a temperaturas superiores a 370 °C, lo cual no supone un problema ya que el enfriador – evaporador reduce la temperatura de los gases de entrada al filtro a 190 °C. No se ve afectado por pequeños contenidos de humedad a elevada temperatura, pero si se expone a vapor saturado a alta temperatura pierde resistencia progresivamente.

Como ya se ha indicado anteriormente, la principal variable de diseño del filtro de mangas es la relación A/C o velocidad de filtración, y el parámetro operatorio más importante es la pérdida de carga total en el equipo.

A excepción de la elección del medio filtrante, el diseño del filtro de mangas se centra en la optimización de la velocidad de filtración, es decir, encontrar el valor que produzca el mínimo coste global (coste de inversión + coste de operación) ya que, a medida que se aumenta la relación A/C, disminuye el coste de inversión (puesto que se reduce el tamaño necesario del equipo) y aumenta el coste de operación (debido a que aumenta la pérdida de carga, y por tanto, la potencia de impulsión demandada).

El diseño se centra en reducir los costes porque cumplir con los límites legales de emisión no suele ser un problema ya que, una vez encontrado el medio filtrante adecuado, un filtro bien diseñado, operando apropiadamente y con un buen mantenimiento, es capaz de captar partículas en un amplio rango de tamaños con rendimientos mayores al 99 %.

La caída de presión en un filtro de mangas viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_c$$

donde,

- ΔP es la pérdida de carga total en el filtro.
- ΔP_m es la pérdida de carga en el medio filtrante.
- ΔP_c es la pérdida de carga debida a perturbaciones en el flujo de gas al atravesar conductos, secciones de entrada – salida y carcasa de la unidad.

Salvo casos inusuales, en los que el flujo de gas sea muy complejo, ΔP_c no suele ser muy importante.

Por otro lado, para cuantificar ΔP_m se usa el modelo denominado de la “Resistencia del Filtro”, que es suficiente para poner de manifiesto las relaciones de dependencia entre las distintas magnitudes involucradas en el proceso de filtración, en especial entre ΔP_m y la relación A/C.

La pérdida de carga en la manga depende de muchos parámetros operatorios, entre los que destacan:

- Velocidad de filtración.
- Modo y frecuencia de limpieza.
- Tipo y concentración en el gas de las partículas a filtrar.
- Tela usada

Y la contribución de ΔP_m a la pérdida de carga total en el filtro se debe tanto a la tela como a la torta de polvo que crece en ella, por tanto:

$$\Delta P_m = \Delta P_t + \Delta P_p$$

donde,

- ΔP_t y ΔP_p son las caídas de presión en la tela y en la torta de polvo, respectivamente (en N/m^2 o Pa).

A partir de la ecuación de Darcy para flujo viscosos de fluidos a través de medios porosos, se puede escribir:

$$\Delta P_t = \frac{I_t \cdot \mu \cdot V}{K_t}$$

$$\Delta P_p = \frac{I_p \cdot \mu \cdot V}{K_p}$$

donde,

- I_t e I_p son las distancias recorridas por el gas a través de la tela y de la torta de polvo, respectivamente. (espesores, en m).
- μ es la viscosidad del gas (en $kg/m \cdot s$).
- V es la velocidad de filtración o relación A/C (en m/s).
- K_t y K_p son la permeabilidad de la tela y de la torta de polvo, respectivamente (en m^2).

El tiempo entre ciclos consecutivos de limpieza, es decir, la frecuencia de las mismas, entra en el modelo a través de I_p , ya que el espesor de la torta aumenta a medida que lo hace el tiempo de filtración, o tiempo entre limpiezas, y se van captando partículas. Este incremento es lineal con el tiempo si se opera a velocidad de filtración y concentración de polvo constantes, por tanto:

$$I_p = \frac{C_p \cdot V \cdot t}{\bar{\rho}_p}$$

donde,

- C_p es la concentración de partículas en el gas, también denominada carga de polvo (en kg/m^3).
- t es el tiempo entre ciclos de limpieza consecutivos (en s).
- $\bar{\rho}_p$ es la densidad aparente de la torta de polvo (en kg/m^3).

Sustituyendo, se llega a la siguiente expresión:

$$\Delta P_m = \left[\frac{I_t \cdot \mu}{K_t} \right] \cdot V + \left[\frac{\mu}{K_p \cdot \bar{\rho}_p} \right] \cdot (C_p \cdot V \cdot t) \cdot V$$

Se parte de unos datos de partida, que son:

- Caudal de gases de entrada (Q_{gas}):

$$m_{\text{gas}} = m_{g2} + m_{v1} + m_{ev} + m_{\text{aire}} = 18273,26(\text{kg/h})$$

$$\bar{\rho}_{\text{gas}}(T_{G2} = 190^\circ \text{C}) = \frac{\rho_{g2} \cdot m_{g2} + \rho_{v1} \cdot m_{v1} + \rho_{ev} \cdot m_{ev} + \rho_{\text{aire}} \cdot m_{\text{aire}}}{m_{g2} + m_{v1} + m_{ev} + m_{\text{aire}}} = 0,712(\text{kg/m}^3)$$

$$Q_{\text{gas}} = \frac{m_{\text{gas}}(\text{kg/h})}{\bar{\rho}_{\text{gas}}(\text{kg/m}^3)} \cdot \frac{1}{3600} = 7,13(\text{m}^3/\text{s})$$

- Concentración de partículas en suspensión (C_p):

$$C_p = \frac{m_p(\text{kg/h})}{Q_{\text{gas}}(\text{m}^3/\text{h})} \cdot 1000 = 27,28(\text{g/m}^3)$$

- Temperatura de entrada del gas: $T_{G2} = 190^\circ \text{C}$.
- Diámetro máximo de partícula: $d_{p,\text{max}} = 89,53 \mu\text{m}$
- Tipo de polvo: Limos y arcillas.

La velocidad máxima de filtración en filtros limpiados por pulsos de aire a presión y para partículas en suspensión muy pequeñas, como es el caso en estudio, está comprendida entre 2,1 – 2,5 (m/min). Se toma una velocidad de filtración 2,1 (m/min) del lado más conservador, por tanto $V = 2,1 \text{ m/min}$.

De la relación A/C o velocidad de filtración se obtiene el área neta de filtración (A_n), tal y como sigue:

$$V(m/s) = \frac{Q_{gas}(m^3/s)}{A_n(m^2)} \Rightarrow A_n = 203,71(m^2)$$

Las dimensiones típicas de las mangas se encuentran en 5 – 6 pulgadas de diámetro y 8 – 20 pies de longitud. Se selecciona una manga de 3500 mm de longitud y 150 mm de diámetro, por tanto, el área de la manga, supuesta ésta con geometría cilíndrica es:

$$L_{manga} = 3,5(m)$$

$$D_{manga} = 0,15(m)$$

$$A_{manga} = \pi \cdot D_{manga} \cdot L_{manga} = \pi \cdot 0,15 \cdot 3,5 = 1,65(m^2)$$

Por tanto, el número de mangas (N_{mangas}) necesarias es:

$$N_{mangas} = \frac{A_n}{A_{manga}} = 124 \text{ mangas.}$$

En la siguiente tabla se resumen las características del filtro de mangas diseñado:

Material de las mangas	Velocidad de filtración	Área neta de filtración	Nº de Mangas	Nº de compartimentos
Tela de Nómex	2,1 (m/min)	203,71 (m ²)	124	1 al ser filtro de pulsos