

PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO PRELIMINAR DE UN FILTRO COALESCENTE

Cintia González Dobrosky

Resumen

El presente trabajo describe los filtros coalescentes, uno de los equipos para captura de niebla más eficientes, de bajo costo operativo y con menores limitaciones en su aplicación, comparado con otras opciones en el mercado. Se esclarece el funcionamiento y las ecuaciones que lo rigen, así como las características ideales del medio filtrante. Se propone una metodología a seguir para el diseño y escalamiento de este tipo de equipos de recuperación de líquidos en corrientes gaseosas a partir de pruebas experimentales, con el fin de guiar al lector interesado en su construcción.

Palabras clave: filtración; gases; separación tecnológica; estados de la materia; diseño y escalamiento.

Abstract

This paper describes coalescing filters which are one of the equipments for most efficient capture and recovery of mist. They are inexpensive and have fewer limitations in their application, regarding other options on the market. This research clarifies the operation equations that model them and describes ideal characteristics of filter media. It also proposes a methodology for design and scale-up of this type of equipment for liquid recovery, supposing experimental data is available, in order to guide the reader in coalescing filter making.

Keywords: filtration; gases; technological separation; conditions of the matter; design and scale-up.

Recibido: 21 de Octubre 2013 **Aprobado:** 20 de Octubre 2014

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, parece que el conocimiento de ciertas tecnologías está en manos de algunos pocos que procuran evitar la competencia en defensa de sus intereses económicos. Algunos investigadores, como Wines, Whitney, & Arshad (2011) y Ludwig (1999), han publicado sus escritos donde se describe a grandes rasgos las ecuaciones que modelan el diseño de equipos para captura de niebla, pero la transparencia de sus publicaciones ha sido escasa respecto al diseño de los mismos. La presente investigación tiene como objetivo informar al lector acerca de los filtros coalescentes, una excelente opción

de bajo costo operativo para la recuperación de aerosoles líquidos en corrientes gaseosas, pero sobre todo, pretende profundizar en su diseño, ya sea con fines didácticos para diseños a escala laboratorio o con fines comerciales para estudios de planta piloto.

Los principios físicos de funcionamiento de algunos equipos son similares entre sí. Un ejemplo de estos son los filtros de fibras para captura de líquido y las columnas empacadas de absorción líquido-gas. Ambos son lechos empacados y tienen la particularidad de que la fase gas se mueve entre los intersticios de acuerdo con modelos de flujo similares. Se rigen por variables críticas de diseño, como la



velocidad de inundación. En ninguno de los dos equipos se busca la acumulación del líquido, sino más bien el drenaje adecuado de este que permita su operación en estado estacionario.

Los filtros coalescentes están constituidos por fibras sostenidas entre mallas tejidas de alambre, los cuales se aplican en la captura de partículas de líquido de una corriente gaseosa, generalmente en ámbitos pequeños desde $0,01 \mu\text{m}$ a más de $3 \mu\text{m}$, capaces de remover más del 95 % en masa del líquido que ingresa con el gas. Los mecanismos de captura pueden ser tres dependiendo de su diámetro: intercepción directa, impacto inercial y captura browniana. En partículas más pequeñas, menores que $1 \mu\text{m}$, impera el movimiento browniano porque estas se comportan como las moléculas de gas, son capaces de seguir los cambios de dirección de la corriente y evitar el choque con los obstáculos.

Para determinar la eficiencia de un filtro de aire o retener partículas en mediciones de gases, normalmente se utilizan filtros cuyas eficiencias se definen según el método bajo el cual fueron probados, entre ellos, la eficiencia ASHRAE y la eficiencia DOP. La ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers) provee dos de los criterios de evaluación importantes en la eficiencia del filtro: eficiencia de mancha (simplemente "eficiencia" para la ASHRAE) y retención de polvo, ambas mediciones realizadas con polvo sintético y el filtro limpio. La eficiencia de mancha es una medida de la habilidad del filtro para remover polvo atmosférico del aire en prueba, mediante dos papeles objetivos que se colocan antes y después del filtro que luego se evalúan por transmisión de la luz. Una eficiencia alta resulta en una resistencia alta de mancha. Por otro lado, la retención en masa es un ensayo gravimétrico que mide la habilidad para separar polvo sintético, partículas relativamente groseras comparadas con el aerosol ambiental, por lo tanto, son más optimistas respecto a lo que indica luego la realidad (Camfil Farr, 2002).

El DOP es un líquido orgánico, que abrevia su nombre químico en inglés dioctyl phthalate (dioctil ftalato). Este líquido se vaporiza por calentamiento y luego se enfría para que condense, mientras se generan partículas con una distribución casi monodispersa de $0,3 \mu\text{m}$. Una

parte del aerosol generado se mezcla con aire y se pasa a través del filtro de prueba. Los valores comúnmente se reportan como porcentajes de remoción a $0,3 \mu\text{m}$ (Wines et al, 2011).

Las partículas líquidas dejan su forma original cuando son capturadas, por ello para recuperarlas no basta con un filtro muy fino que tenga un eficiencia ASHRAE o DOP de más del 99 % en masa, por ejemplo, ya que el primer método sólo aplica para partículas sólidas y el segundo no evalúa filtros saturados ni bajo condiciones reales en planta. La característica determinante en el desempeño de estos equipos es el drenaje del líquido capturado, que está afectado por distintas variables, entre ellas el diseño de la carcasa, el material de las fibras y la velocidad de operación. Existen varias casas fabricantes especializadas en este tipo de filtros, con gran conocimiento técnico y científico en el diseño de los mismos y notablemente con amplia experiencia.

2. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FILTRANTE

Los medios filtrantes de fibra de vidrio se utilizan ampliamente para aplicaciones de filtración donde se requiere la coalescencia de partículas líquidas. Diferentes grados de fibras están disponibles para una variedad amplia de aplicaciones. El silicio es el ingrediente base de la mayoría de las formas de fibra de vidrio. Tasas de flujo más altas y una filtración efectiva de gotas del orden de las micras y aún menores, pueden alcanzarse mediante el uso de medios filtrantes de fibra de vidrio (Usman, 2010).

Los filtros especiales para nieblas y aerosoles líquidos deben diseñarse con sistemas de drenaje, diámetros de fibra colocados en cierto orden respecto a la dirección del flujo de gas que permitan la coalescencia y preferiblemente con materiales de energía superficial baja relativo al líquido a separar, para que no se empapen y permitan el drenaje de las gotas que van aumentando su tamaño y caen por gravedad.

Usman (2010) realizó un estudio experimental para mejorar el desempeño y el drenaje en los filtros coalescentes de partículas, empleando un medio filtrante de fibra de vidrio con diámetros

de fibra en el orden de 3 μm , 6 μm , 10 μm y 39 μm , con las fibras de 3 μm corriente arriba del filtro. Conforme las gotas se mueven a través del espesor del filtro, se unen para formar gotas más grandes. Debido a que está diseñado con poros de menor a mayor tamaño a lo largo del lecho filtrante, permite capturar gran variedad de tamaños de gotas y conforme avanza la corriente de aire, las gotas aumentan su tamaño y podrán atravesar con facilidad los poros más grandes de las fibras siguientes, lo cual mejora el drenaje para ayudar a reducir la generación secundaria de aerosol o arrastre del líquido atrapado y provoca una caída menor de presión. El drenaje fue mejorado con la inserción de filtros tejidos de energía superficial baja, que reducen la adherencia del líquido sobre las fibras. El mejor desempeño fue logrado con drenajes de Teflon®. También demostró que la eficiencia del filtro aumenta con el número de canales de drenaje y esto a su vez reduce en mayor medida la caída de presión.

Respecto a los materiales, si bien se utiliza fibra de vidrio para la captura y coalescencia de las partículas, los canales de drenaje son comúnmente elaborados de polipropileno, poliéster o Teflon®. Este último no es el más empleado por ser el más caro. Según investigaciones, como en Wines et al (2011), Usman, (2010), Miller, Koslow y Williamson (1988), una manera de mejorar el drenaje de las gotas de líquido es aplicar a la superficie un tratamiento que cambie las propiedades del medio filtrante y reduzca la adherencia del líquido sobre las fibras. Esto permite reducir el arrastre del

líquido capturado y aumenta la velocidad máxima permisible del aire que está limitada por este efecto, lo que a su vez permite el manejo de flujos mayores. Compuestos fluorocarbonados, tales como FC-824, un copolímero perfluoro-acrilato, pueden aplicarse durante la elaboración de la mezcla de fibras o por inmersión del medio filtrante que luego se deja secar (Miller et al, 1988).

3. DESEMPEÑO DE LOS FILTROS COALESCENTES

Los filtros coalescentes se utilizan comúnmente para limpiar el aire que sale de los compresores con cierta cantidad de aceite de lubricación. En casos donde el aire está cargado con otras partículas sólidas, se colocan aguas abajo de removedores primarios de partículas, para evitar la saturación de los cartuchos, que son más finos y normalmente más caros. Investigadores de Pall Corporation evaluaron el desempeño de un filtro coalescente de prueba mediante el método LASE (Liquid Aerosol Separation Efficiency), empleando aire comprimido cargado con 1 112 $\mu\text{g/g}$ de aerosol de aceite de 0,1 μm a 1 μm . La concentración en el aire de salida fue de 0,01 $\mu\text{g/g}$, con una velocidad mínima de operación de 24,38 m/s en la carcasa del filtro (Wines et al, 2011).

El fabricante Koch-OttoYork® ofrece un separador de nieblas para tamaños de partículas de 0,1 μm e inclusive más pequeñas. Según

Tabla 1. Eficiencias de colección y caídas de presión para diferentes colectores de líquido de la marca FLEXIFIBER®

Tipo	Eficiencia de colección		Caída de presión, $\Delta P/\text{Pa}$	Velocidad del gas, $u/(\text{m/s})$
	Diámetro de partícula, $d/(\mu\text{m})$	Eficiencia, $\eta/(\%)$		
BD	>3	Prácticamente 100	4 980 a 498	0,03 a 0,20
	<3	Más de 99,95		
IC	>3	Prácticamente 100	996 a 2 490	1,30 a 1,80
	1 a 3	95 a 99+		
IP	1 a 3	85 a 97	1 245 a 1 743	2,03 a 2,54
	0,5 a 1	50 a 85		

Nota: Adaptado de "FLEXIFIBER® Mist Eliminators" por Koch-Otto York®, 2002.

el ámbito de partículas por separar y por tanto el mecanismo de separación, tiene tres tipos de eliminadores tal como se muestra en la Tabla 1. Nótese que mientras más pequeñas son las partículas por capturar, se requiere una velocidad menor del gas a través del elemento filtrante, ya que velocidades altas reducen el tiempo de paso a través del cartucho y la probabilidad de choque de las partículas con las fibras. La eficiencia allí reportada corresponde a la captura de niebla de ácido sulfúrico.

Las velocidades bajas de operación de estos equipos para cumplir con las expectativas de eficiencia, sugiere una gran área de filtración en aquellos casos donde el flujo de aire a tratar es muy alto, o sea, se requerirían muchos elementos filtrantes. Sólo el diseño del fabricante podría indicar si se cuenta con el espacio para la colocación de este tipo de sistema de filtración en el sitio existente, si el número de colectores, la eficiencia de los mismos, la caída de presión y la inversión inicial requerida permite que el proyecto sea técnicamente factible y rentable. En el mercado se encuentran opciones de equipos para la captura de niebla que pueden resultar muy eficientes

pero con un costo operativo mucho mayor, como sistemas de absorción con destilación.

4. METODOLOGÍA

4.1. Estructura física

Considérese un diseño del tipo mostrado en la Figura 1, con uno o varios cartuchos. En él, el aire cargado de partículas líquidas entra al filtro coalescente y el flujo se divide entre el número de tubos internos. Cada tubo consta de dos mallas tejidas de alambre concéntricas que permitan el flujo del gas. En el ánulo se coloca un sistema de fibras apropiado para la aplicación.

4.2. Velocidad máxima permisible

Esta velocidad máxima está limitada por el arrastre de líquido que se da a muy altas velocidades del gas. Para prevenir el arrastre en lechos porosos, se puede utilizar

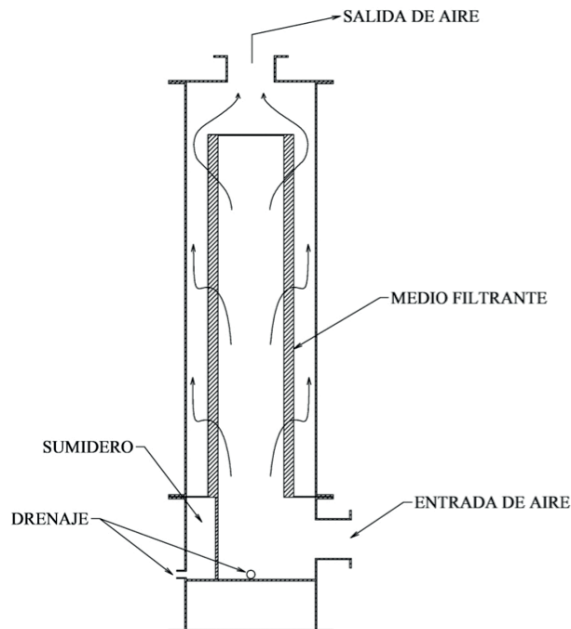


Figura 1. Corte transversal de la estructura de un filtro coalescente.

la aproximación dada por Kister, cuya correlación fue probada para varios diseños de empaques en columnas empacadas. Para obtener un estimado de la velocidad de inundación, primero se calcula el parámetro de capacidad k , el cual se puede aproximar según la siguiente ecuación para empaques estructurados (Smith, 2005):

$$k = \exp[-1,931 - 0,402 \ln F_{LV} - 0,0342(\ln F_{LV})^2] \quad (1)$$

Donde F_{LV} es el parámetro de flujo líquido-gas, el cual se calcula (Smith, 2005):

$$F_{LV} = \frac{L}{G} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0,5} \quad (2)$$

Donde:

L : Velocidad másica del líquido, kg/s

G : Velocidad másica del gas, kg/s

ρ_g : Densidad del gas, kg/m³

ρ_L : Densidad del líquido, kg/m³

El valor de k es el mismo factor de correlación presentado en Ludwig (1999) que se utiliza para determinar la velocidad permisible del gas para el diseño de un filtro tipo mallas de alambre. Para una malla colocada en posición horizontal, la velocidad máxima permisible es calculada por la Ecuación (3):

$$u_a = k \left(\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0,5} \quad (3)$$

Cuando la malla está colocada en posición vertical, la gravedad ya no es un componente en contra del arrastre del gas, por lo cual la velocidad máxima permisible es menor, generalmente empleada como 0,67 veces el valor calculado en la Ecuación (3) (Ludwig, 1999).

Debe verificarse que la velocidad en el ánulo del equipo (en el área transversal ocupada por la carcasa del filtro menos el área transversal total ocupada por

los tubos) al menos no sobrepase el valor de u_a . Por lo tanto, el área anular mínima A_{an} se calcula con base en la velocidad anular máxima permisible:

$$A_{an} = \frac{Q}{u_a} \quad (4)$$

4.3. Velocidad de diseño

Para permitir cambios repentinos en el flujo, en la concentración de líquido de la corriente gaseosa u otras peculiaridades, se usa como velocidad de diseño la representada en la Ecuación (5) (Ludwig, 1999). Esta es la velocidad promedio que debe tener el aire que pasa a través del área superficial de los tubos:

$$u_d = 0,75u_a \quad (5)$$

Cuando se calcula el área filtrante y esta debe acoplarse a un tamaño estándar o previamente establecido, es importante saber que la variación entre el 30 % y el 100 % en la velocidad de diseño normalmente es aceptable para la mayoría de los casos. La velocidad de inundación está usualmente entre el 120 % y el 140 % de la velocidad máxima permisible u_a (Ludwig (1999).

4.4. Cálculo de las dimensiones de los tubos

El flujo de gas Q está dado por las condiciones del proceso. Para determinar el área filtrante de cada tubo se emplea la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q}{Nu_d} \quad (6)$$

Donde N es el número de cartuchos definido a conveniencia, según el tamaño deseado del equipo (ancho, altura). El área filtrante A es el área superficial del cilindro, la cual determina el diámetro D y la longitud H del mismo, tal como se muestra en la Ecuación (7). Normalmente el diámetro del cartucho se elige a conveniencia, considerando los tamaños estándar disponibles.

$$DH = \frac{A}{\pi} \quad (7)$$

4.5. Caída de presión a través del medio filtrante

Se determina mediante la correlación encontrada por Liew & Conder (1985) para la razón de caídas de presión en húmedo y en seco. La caída de presión en seco se predice mejor con la ecuación empírica de Davies (1952, citado en Liew & Conder, 1985), para filtros con una fracción de vacío menor que 0,98 y que fue probada en fibras de 22 μm , 12 μm y 8 μm de diámetro. Combinadas, se obtiene una aproximación de la caída de presión a través del medio filtrante en operación:

$$\Delta P_w = 69,76 \frac{(u * \mu_g)^{0,523} L^{0,439} \alpha^{0,939}}{d_f^{1,439} (t \cos \theta)^{-0,477}} (1 + 56\alpha^3) \quad (8)$$

Donde:

ΔP_w : Caída de presión del filtro húmedo, Pa

u : Velocidad superficial del gas, m/s

μ_g : Viscosidad del gas, Pa•s

α : Fracción de volumen de fibras en el medio filtrante, adimensional.

L : Espesor de la tela filtrante, m

d_f : Diámetro de la fibra, m

t : Tensión superficial del líquido a recolectar, N/m

θ : Ángulo de contacto entre el material de la fibra y el líquido, grados (°)

4.6. Selección del medio filtrante

Se elige un medio filtrante inerte, con resistencia mecánica a la flexión y resistente a la temperatura de operación. Normalmente el espesor comercial de estos tiende a variar de 0,5 a 2 cm. Según investigaciones, como las encontradas en Usman (2010) y Miller et al (1988), un medio filtrante óptimo debe tener:

- Una primera etapa para eliminar las partículas sólidas del aire y proteger la fibra de vidrio de la obstrucción, preferiblemente de un diámetro de poro que vaya en reducción o simplemente que tenga un diámetro de poro mayor que el de la capa fibra de vidrio. Puede ser de celulosa, poliéster o polipropileno (500 μm el diámetro del poro).
- Una segunda etapa para que las gotas lleguen a la coalescencia, siendo de fibra de vidrio, con diámetros de fibra en aumento (por ejemplo, capas superpuestas de 3, 6, 10, y 39 μm), con una o varias capas hidrofóbicas y oleofóbicas (como Teflón®, 500 μm) en el medio, preferiblemente, para reducir la caída de presión y la saturación de la fibra de vidrio (aumenta su vida útil).
- Una tercera etapa para que las gotas drenen con facilidad. Se prefiere un material que repela el líquido que interesa recuperar. Puede ser de Teflón® o polipropileno (500 μm el diámetro del poro).

4.7. Experimentación

Se prueba a escala laboratorio uno o varios medios filtrantes recomendados con los cuales se obtienen bajas caídas de presión y eficiencias de alrededor del 98 % para separación de partículas líquidas, o se escala a partir de las condiciones y resultados de Usman (2010), para lo cual habría que asegurarse un proveedor que ofrezca medios filtrantes personalizados.

4.8. Escalamiento

Zlokarnik (2002) describe la separación de partículas por medio de fuerzas inerciales, para lo cual considera la separación de aerosoles de una corriente gaseosa en un separador (filtro, ciclón, etc.) y realiza un análisis dimensional para relacionar las variables que determinan la eficiencia de separación del equipo: parámetros geométricos (diámetro de partícula, longitud característica del separador), propiedades físicas (densidad de la partícula, densidad y viscosidad del gas) y parámetros de proceso (velocidad del gas o caída de presión, estas dos dependientes entre sí), tal que se relacionan formando números

adimensionales conocidos, como son el número de Euler (Eu), el número de Reynolds (Re) y el número de Stokes (Sto). (Ver ecuación 9)

$$\psi^{3/2} = \frac{d_p^3 \rho_L^{3/2} \Delta P_w}{\rho_g^{1/2} \mu_g^2 D_h} = Eu Re^{1/2} Sto^{3/2} \quad (9)$$

Esta combinación de números adimensionales fue obtenida y nombrada originalmente por Bürkholz (1989), citado en Zlokarnik (2002), quien le llamó “deposition number” o número de separación, donde d_p es el diámetro de la partícula líquida (m) y ΔP_w es la caída de presión a través del filtro húmedo (Pa) saturado en equilibrio. D_h es el diámetro hidráulico, que se calcula mediante la Ecuación (10):

$$D_h = 4 \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \left(\frac{1}{a_s} \right) \quad (10)$$

Donde a_s es la relación del área superficial de la fibra entre el volumen de la fibra (m^2/m^3) y $\varepsilon = 1 - \alpha$, la fracción de vacío del medio filtrante.

Para el escalamiento, se asume que la eficiencia por impacto inercial es predominante en filtros de profundidad, tal como indica De Nevers (1998). Se debe mantener la misma eficiencia del filtro tanto en pequeña como en gran escala; para ello, los números de separación ($\Psi^{3/2}$) en escala laboratorio (1) y escala industrial (2) se igualan (Zlokarnik, 2002) tal como se muestra en la Ecuación (11) y se definen en la Ecuación (12).

$$\psi_1^{3/2} = \psi_2^{3/2} \quad (11)$$

$$\frac{d_{p1}^3 \rho_{L1}^{3/2} \Delta P_{w1}}{\rho_{g1}^{1/2} \mu_{g1}^2 D_{h1}} = \frac{d_{p2}^3 \rho_{L2}^{3/2} \Delta P_{w2}}{\rho_{g2}^{1/2} \mu_{g2}^2 D_{h2}} \quad (12)$$

Si las pruebas a escala laboratorio se realizan con el mismo fluido gaseoso de planta, el mismo líquido con la misma distribución del tamaño de partícula, igual medio filtrante y temperatura de

operación, las Ecuaciones (8) y (12) combinadas se reducen a:

$$u_1 = u_2 \quad (13)$$

La cual es la ecuación para el escalamiento del filtro y con la cual se espera que la caída de presión y la eficiencia lograda en pequeña escala sea la misma que a gran escala. La caída de presión nueva, en caso de no poder mantenerse exactamente la misma velocidad, se determinaría mediante:

$$\Delta P_{w2} = \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^{0,523} \Delta P_{w1} \quad (14)$$

Si se recurre a escalar los resultados obtenidos por Usman (2010) o por algún otro experimento que utilice un aceite de prueba distinto al que interesa recuperar en planta, y se desea obtener la misma eficiencia y caída de presión, se debe ajustar la velocidad con la Ecuación (15) para procurar una misma caída de presión a través del medio filtrante.

$$u_2 = \left\{ u_1^{0,523} \left[\frac{(t \cos \theta)_1}{(t \cos \theta)_2} \right]^{0,477} \left[\frac{\rho_{L1}}{\rho_{L2}} \right]^{3/2} \right\}^{1/0,523} \quad (15)$$

Usman (2010) utilizó una velocidad (u_1 en la ecuación anterior) de 0,6 m/s porque esta es la media de las velocidades comúnmente utilizadas para el diseño de filtros coalescentes. El aceite de prueba fue Sullube 32[®], un lubricante para compresores.

Cabe resaltar que los fabricantes que ofrecen la mejor tecnología de estos tipos de colectores de niebla, tienen equipos con diseños estándar, cuya caída de presión para una determinada aplicación y condiciones de operación, se determina mediante programas de software de la misma empresa.

5. CONCLUSIONES

- Un filtro para captura de partículas líquidas en corrientes gaseosas es un lecho poroso, debido a esto se comporta como una torre empacada a través de la cual pasa un flujo de gas, por lo que las variables que describen la inundación como parámetro de diseño son correspondientes y

las ecuaciones que la modelan son aplicables en este tipo de filtración.

- Para evitar el arrastre progresivo del líquido en la corriente de gas, se puede establecer una velocidad máxima permisible con la velocidad de inundación, esto a su vez permite determinar el tamaño del medio filtrante y de la carcasa, según el flujo de gas y de líquido que se desea tratar.
- Un análisis dimensional del proceso de captura de partículas en una corriente gaseosa permite definir un número adimensional que describe la eficiencia de separación de un filtro de partículas para determinar las variables que predicen su desempeño ante modificaciones de diseño realizadas en la práctica. Dicha eficiencia es el parámetro que se desea mantener en el separador tanto en pequeña como en gran escala.
- El diseño de un filtro coalescente tiene consideraciones distintas a las presentadas en sistemas de filtración convencionales debido a que las partículas que se desean capturar se encuentran en estado líquido y su forma es variable. En este caso, no aplica la recomendación de colocar telas filtrantes con diámetro de poro en reducción para evitar su saturación, como sucede en filtración de partículas sólidas. El objetivo principal de un filtro para aplicaciones húmedas es la coalescencia y el drenaje de las partículas que logran entrar en contacto con el medio filtrante, para lo cual el material del mismo juega un papel importante y los tamaños de poro deben colocarse en aumento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Camfil Farr. (Diciembre, 2002). ASHRAE Testing for HVAC Air Filtration: A Review of Standards 52.1-1992 & 52.2-1999. *Technical Services Bulletin*. Recuperado el 2 de Enero de 2013, de: <http://www.camfilfarr.no/FileArchive/Quality%20certificates%20and%20awards/ASHRAE52.pdf>
- De Nevers, N. (1998). *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Koch-Otto York®, (2002). *FLEXIFIBER® Mist Eliminators*. Recuperado el 22 de Octubre del 2012, de: <http://www.lbltrading.com/suppliers/kochottoyork/FLEXIFIBER.pdf>
- Liew, T., & Conder, J. (1985). Fine mist filtration by wet filters: I. Liquid saturation and flow resistance of fibrous filters. *Journal of Aerosol Science*, 16(6), 497-509.
- Ludwig, E. (1999). *Applied process design for chemical and petrochemical plants* (3a ed., Vol. 1). Houston, TX: Gulf Professional Publishing.
- Miller, J., Koslow, E., & Williamson, K. (1988). Patente n° 4759782. Estados Unidos: U.S. Patent.
- Smith, R. (2005). *Chemical process design and integration*. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- Usman, S. (2010). *Improving performance and drainage of coalescing filters* (Disertación doctoral, Universidad de Akron, Akron, Estados Unidos). Recuperado de: https://etd.ohiolink.edu/ap:0:0:APPLICATION_PROCESS=DOWNLOAD_ETD_SUB_DOC_ACCNUM:::F1501_ID:akron1279317322.inline.
- Wines, T., Whitney, S., & Arshad, A. (Julio, 2011). Liquid-Gas Coalescers: Demystifying Performance Ratings. *Chemical Engineering*, 38-45. Recuperado de: http://www.pall.com/pdfs/Fuels-and-Chemicals/FC_CHEMENGEN.pdf
- Zlokarnik, M. (2002). *Scale-Up in Chemical Engineering*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH.

SOBRE LA AUTORA

Cintia González Dobrosky. Licenciada en Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: cimil33@gmail.com