

Diseño del sistema de elución y filtrado de una planta de extracción

Informe de avances de investigación

Autor

Juan David Argüello Plata

Ingeniero Mecánico

Director

Omar Armando Gélvez Arocha

Químico PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultado de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Maestría en Ingeniería Mecánica

2020

Índice

Introducción	2
1. Marco teórico	3
1.1. Sedimentación	3
1.1.1. Sedimentación con coagulantes	3
1.1.2. Sedimentadores de <i>placas paralelas</i>	4
1.2. Turbiedad	5
2. Diseño del sistema	6
2.1. Naturaleza del flujo	6
2.2. Parámetros operacionales	7
2.3. Dimensionamiento	8
2.3.1. Panel de lamelas	9
2.4. Método de Hazen → tiempo de sedimentación	10
2.5. Tamaño de partícula mínima	10
3. Resultados	11

Índice de figuras

1. Sedimentador de placas paralelas.	4
2. Velocidad de asentamiento de partículas discretas en un fluido estático.	8
3. Sistema de elución y filtrado.	11

Introducción

En el presente documento se presenta el desarrollo del diseño funcional del sistema de *elución y filtrado* con base en una metodología de diseño teórica; definiendo parámetros como: régimen de flujo (número de Reynolds), distribución geométrica del sistema, presión, temperatura y caudal, entre otros.

1. Marco teórico

1.1. Sedimentación

La sedimentación es uno de los procesos más antiguos en el tratamiento del agua y consiste en la deposición de materiales sólidos de mayor peso que el agua.

Existen cinco tipos de sedimentación que se clasifican de acuerdo a la clase de partículas, características superficiales y concentración de las mismas:

- Sedimentación *discreta*: las partículas no tienden a aglomerarse, mantienen su tamaño e individualidad. Son generalmente de textura arenosa.
- Sedimen *floculenta*: las partículas floculan y tienden a agruparse durante el proceso.
- Sedimentación *másica*: la concentración de partículas es tan grande que colisionan entre sí, sedimentando como una masa.
- Sedimentación por *compresión*: la concentración de partículas es tan grande que cada una reposa sobre la otra, presentándose una especie de soporte entre cada una de ellas; el peso de las partículas superiores tiende a compactar a las inferiores.
- Sedimentación de *alta tasa*: es una variación de la sedimentación discreta, en la que se insertan placas paralelas con el fin de aumentar la eficiencia de remoción de partículas.

La *sedimentación* realiza la separación de los sólidos más densos que el agua y la *filtración* separa aquellos que tienen una densidad muy cercana a la del fluido.

1.1.1. Sedimentación con coagulantes

Se efectúa la decantación de partículas en las cámaras de floculación; el tamaño y densidad de las partículas y viscosidad del agua desempeñarán un papel importante en el dimensionamiento de los sedimentadores. Las unidades podrán ser circulares o de flujo radial, cuadradas y rectangulares. Si los tanques sedimentadores se diseñan en dos o más pisos, podrán ser de flujos independientes o de flujo *zig-zag*, de manera que el flujo recorra todos los pisos de la unidad.

1.1.2. Sedimentadores de *placas paralelas*

Se trata de un tipo de sedimentador desarrollado por Hazen A, en 1904, quien expuso el siguiente principio: “como la acción de un tanque sedimentador depende de su área, y no de su profundidad, una subdivisión horizontal produciría una superficie doble para reunir sedimentos en lugar de una sencilla y duplicaría la cantidad de trabajo”.

La diferencia de los sedimentadores de tasa normal y los de alta tasa son:

- El fondo del decantador no es horizontal sino inclinado.
- La profundidad del decantador es baja, de forma que hay que construir un número considerable de celdas superpuestas para poder tratar los volúmenes de agua.
- El flujo **debe ser laminar**, con número de Reynolds entre 80 y 250.

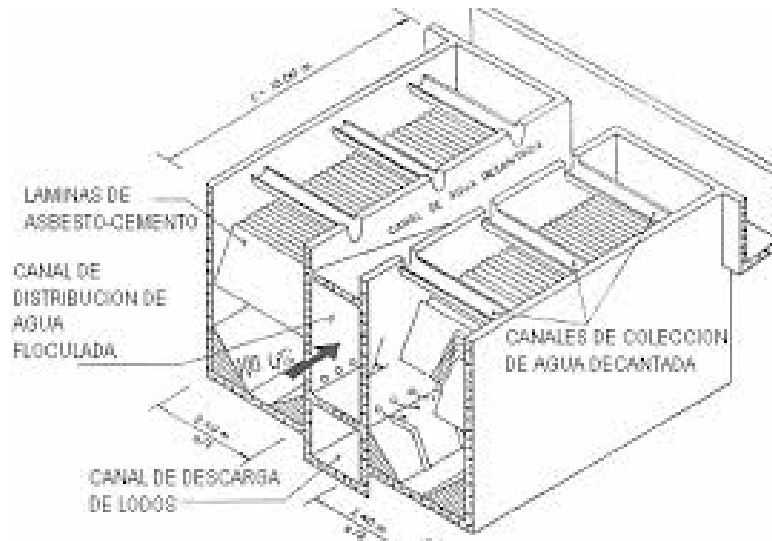


Figura 1: Sedimentador de placas paralelas.

Las placas presentan una inclinación, donde el agua ascendente deposita sobre ellas el material que trae en suspensión. Los lodos resbalan pendiente abajo, y pueden ser recolectados en una tolva en la parte inferior de la estructura.

$$V_s = \frac{V_0 S}{\sin \theta + \frac{L}{e} \cos \theta} \quad (1)$$

La Ecuación 1, para un determinado posicionamiento de las placas, permite determinar la velocidad requerida para conseguir una velocidad crítica. Es crucial mantener el número de Reynolds bajo para evitar que la turbulencia levante los lodos de la cara de las placas donde se está sedimentando.

1.2. Turbiedad

La turbidez es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de la luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra.

La turbiedad en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos.

La eliminación de la turbiedad se lleva a cabo mediante procesos de coagulación, asentamiento y filtración.

2. Diseño del sistema

La etapa de elución y filtrado consiste en separar la fase sólida (material pulverizado compuesto por el residuo del material vegetal y el agente dispersante) de la líquida (mezcla homogénea entre el extracto y el solvente). Se propone el diseño de un sedimentador de placas planas, con 50° de inclinación, como sistema de separación entra fases.

El sistema a diseñar presenta las siguientes especificaciones y requerimientos:

- Capacidad de procesamiento de $20[kg]$ de material vegetal.
- La masa del material pulverizado a procesar corresponde a $100[kg]$ (relación másica 1 a 4 entre el material vegetal y el agente dispersante).
- Se estima un tiempo de procesamiento de, máximo, tres horas y media.

Para el análisis del fenómeno físico, se emplean las siguientes suposiciones:

1. Cada partícula se trata como un cuerpo esférico micrométrico de tamaño equivalente a $250[\mu m]$.
2. El fenómeno a describir se trata de *sedimentación discreta* (las partículas no tienden a aglomerarse y se desprecian los efectos de colisión entre ellas).

El volumen a procesar, entre el material pulverizado y el solvente, es de $0,3[m^3]$ y se busca procesar este volumen en $1[h]$; requiriendo trabajar con un caudal de $0,3[m^3/h]$. El tamaño medio del material particulado es de $250[\mu m]$.

2.1. Naturaleza del flujo

Para asegurar el éxito del sistema de sedimentación, el flujo dentro del sistema no puede ser de carácter turbulento. Debido a ello, según Miguel Vire ("*Diseño de la planta de potabilización del agua*"), se asume regimen laminar; cuya velocidad de flujo se determina a través de la Ecuación 2.

$$V_{laminar} = \frac{g}{18} (S_s - 1) \left(\frac{d_{particula}^2}{\mu} \right) \quad (2)$$

Dónde: $V_{laminar}$ es la velocidad del flujo laminar, S_s es una constante, $d_{particula}$ es el diámetro de una partícula y μ es el valor de la viscosidad cinemática del fluido.

El número de Reynolds caracteriza la naturaleza de un flujo y se calcula con base en la siguiente relación matemática.

$$Re = \frac{V_{laminar} d_{particula}}{\mu} \quad (3)$$

Con base en la Ecuación 3, el número de Reynolds tiene un valor de 3,625; valor superior a 1,0 e inferior a 1000. Indicativo de que el flujo no es de carácter laminar ni turbulento, encontrándose en el **régimen de transición**.

2.2. Parámetros operacionales

Al encontrarse el flujo en régimen de transición, la velocidad de flujo se calcula a partir de la Ley de Allen, mostrada en la Ecuación 4.

$$V_{transicion} = 36 \sqrt{(S_s - 1) \frac{d_{particula}}{C_D}} \quad (4)$$

En donde C_D es una constante que se calcula de la siguiente forma:

$$C_D = \frac{24}{Re_{corregido}} + \frac{3}{\sqrt{Re_{corregido}}} + 0,34 \quad (5)$$

A partir de las características de las partículas y del agua, se obtienen las constantes K_1 y K_2 de la Figura 2; en donde $X_1 = K_1 d$. De modo que:

$$\left(\frac{g(S_s - 1)}{\mu^2} \right)^{1/3} = K_1$$

$$[g(S_s - 1)\mu]^{1/3} = K_2$$

Se calcula una velocidad de transición *corregida* para la determinación del número de Reynolds que se calcula de la siguiente forma:

$$V_{corregida} = X_2 K_2$$

$$Re_{trans} = \frac{V_{corregida} d_{particula}}{\mu} \quad (6)$$

El número de Reynolds de transición presenta un valor de 2,858 con una velocidad de 1,446[cm/s].

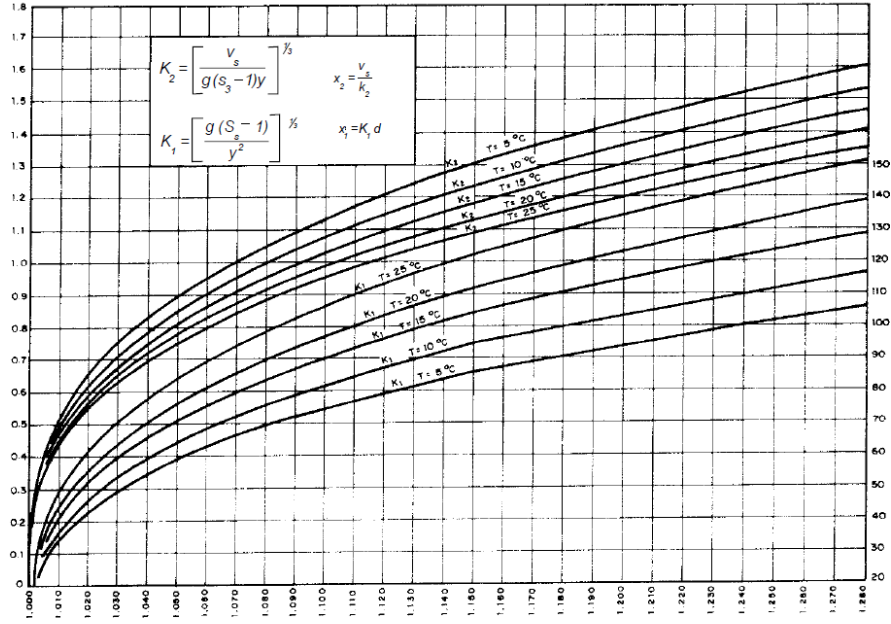


Figura 2: Velocidad de asentamiento de partículas discretas en un fluido estático.

2.3. Dimensionamiento

El sistema de filtrado se trata de un equipo sedimentador de placas planas paralelas inclinadas a 60° . La velocidad crítica de sedimentación de las partículas se calcula a partir de la Ecuación 7 (fórmula de Yao), la cual define el valor de la velocidad mínima requerida para que una partícula se sedimente.

$$V_{sc} = \frac{S_c V_0}{\sin \theta + L_{rel} \cos \theta} \quad (7)$$

De la Ecuación 7, S_c es una constante de sedimentación cuyo valor es 1 para sistemas de *placas paralelas*, V_0 es la magnitud de la velocidad del flujo, L_{rel} es la relación entre la longitud de una lamela y el ancho de la misma; y θ es el ángulo de inclinación de las placas.

La relación entre el ancho e del conducto y la longitud L tiene una importancia especial en la eficiencia del sedimentador. Si esta relación L_{rel} es muy pequeña, cada sedimentador actúa como un sedimentador horizontal corriente de baja velocidad. Debido a que la eficiencia varía lentamente para una $L_{rel} > 20$, se toma un valor de 20.

Para que un sedimentador pueda trabajar con alta velocidad, es necesario que exista flujo laminar en las celdas, esto es que el número de Reynolds sea inferior a 250. Cualquier turbulencia puede generar arrastre de partículas, bajando

notoramente la eficiencia; razón por la que se emplea como criterio principal de diseño.

$$N_R = \frac{V_0 4R_h}{\mu} \quad (8)$$

En dónde R_h es el radio hidráulico, cuyo valor está definido por la Ecuación 9.

$$R_h = \frac{b e}{2(b + e)} \quad (9)$$

De la Ecuación 9: b es el ancho de la lamela y e el largo de la misma. Dimensiones que definen el área transversal de una lamela.

A partir de un proceso iterativo, se obtuvo que las mejores dimensiones son: $b = 30[cm]$ y $e = 2[cm]$; lo que se traduce en un número de Reynolds de 89,69 (régimen laminar).

2.3.1. Panel de lamelas

La mejor relación de eficiencia referente al número de lamelas está entre 5 y 8 lamelas, por lo que se escoge desarrollar el proceso de diseño con 6 lamelas en el panel; seleccionando láminas de calibre 24 para su construcción.

El distanciamiento horizontal entre lamelas se calcula de la siguiente forma:

$$e_x = \frac{e}{\sin \theta} \quad (10)$$

Obteniendo un distanciamiento de $2,31[cm]$. El ancho total del panel se puede calcular a través de la Ecuación 11.

$$P_{ancho} = e_x(N_{lamelas} - 1) + t_{lamela} N_{lamelas} + L_{lamela} \cos \theta \rightarrow P_{ancho} = 34,68[cm] \quad (11)$$

El alto del panel se calcula de la siguiente forma:

$$P_{alto} = L_{lamela} \sin \theta \rightarrow P_{alto} = 39,45[cm] \quad (12)$$

La profundidad del panel es equivalente al ancho de la lamela: $30[cm]$.

2.4. Método de Hazen → tiempo de sedimentación

El concepto de carga hidráulica superficial (parámetro de Hazen) compara la velocidad de sedimentación de la partícula para conocer si alcanza a sedimentarse durante el trayecto por el sistema. La *altura* de sedimentación requerida se calcula mediante la Ecuación 13.

$$H_{sedimentacion} = \frac{e}{\cos \theta} \quad (13)$$

La altura de sedimentación requerida es de 4[cm] (distanciamiento vertical entre lamelas), cuyo tiempo de sedimentación se calcula a través de la siguiente relación matemática:

$$t_{sed} = \frac{H_{sedimentacion}}{V_{corregida}} \quad (14)$$

De acuerdo a la Ecuación 14, se requieren de 2,767[s] para sedimentar las partículas dentro de cada celda.

2.5. Tamaño de partícula mínima

El tamaño de partícula *mínima* se calcula a través de la Ecuación 15.

$$V_{sc} = 0,22 \left[g \left(\frac{\rho_{solido} - \rho_{fluido}}{\rho_{fluido}} \right) \right]^{2/3} \frac{d_{particula}}{\sqrt[3]{\frac{\mu}{\rho_{fluido}}}} \quad (15)$$

De esta manera, se concluye que el sistema diseñado está capacitado para retirar partículas de hasta 40[μm]. La eficiencia del sistema se calcula a través de la siguiente relación matemática:

$$Ef = 1 - \frac{V_{sc}}{V_0} \quad (16)$$

Obteniendo un valor cercano al 91 %.

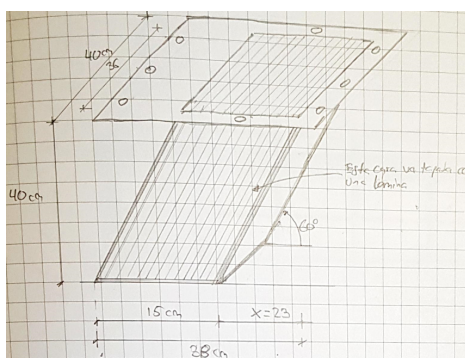
3. Resultados

Los resultados del diseño se pueden apreciar en el Cuadro 1.

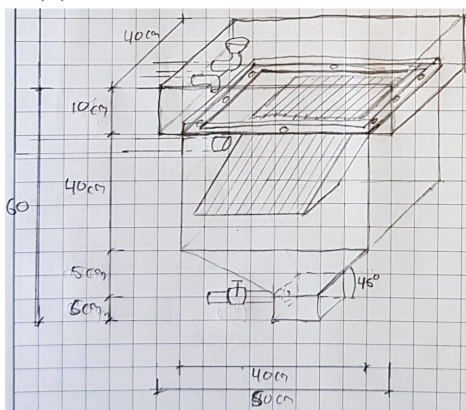
Parámetro	Valor
Caudal [m^3/h]	0,3
Tiempo [h]	1
Altura lamela [cm]	40
Ancho lamela [cm]	36
Espesor de lamela	Calibre 24
Tamaño de partícula mínima [μm]	40
Eficiencia general del sistema	91 %

Cuadro 1: Resumen de resultados.

La distribución geométrica del sistema se puede apreciar en los bocetos mostrados en la Figura 3.



(a) Boceto del panel de lamelas.



(b) Boceto general del sistema.

Figura 3: Sistema de elución y filtrado.