

CAPÍTULO 4

DECANTADORES LAMINARES

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo trataremos exclusivamente del diseño de las unidades de decantación de flujo laminar o de alta tasa. Los decantadores laminares pueden tratar caudales mayores en un área y estructura menor de la que requieren los decantadores convencionales y su eficiencia es superior. Comparándolos con las unidades de contacto de sólidos o decantadores de manto de lodos, que también son de alta tasa, no requieren energía eléctrica para su operación. Por todas estas ventajas, esta unidad es considerada como tecnología apropiada para países en desarrollo y para todo programa de mejoramiento de la calidad del agua que tenga como meta conseguir la mejor calidad al menor costo de producción; esto es, para la sostenibilidad de los proyectos.

2. DECANTADORES DE PLACAS

- Mediante la colocación de placas paralelas o módulos de diferentes tipos en la zona de sedimentación, se obtiene en estas unidades una gran superficie de deposición para los lodos, con lo cual se logra disminuir apreciablemente el área superficial de los tanques.

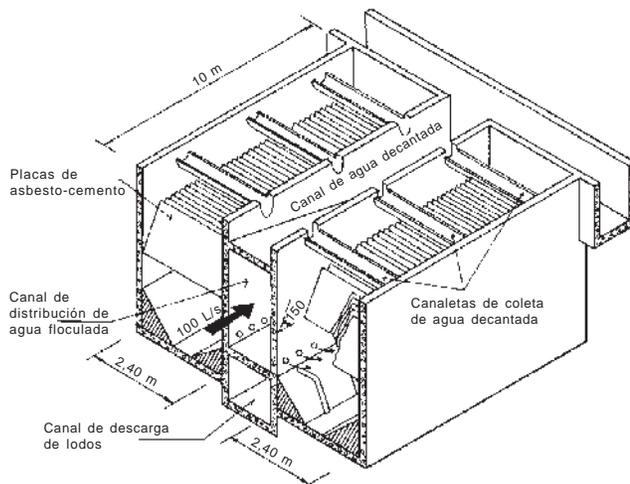


Figura 4-1. Decantador de placas paralelas (1)

La diferencia básica entre los decantadores laminares o de alta tasa y los decantadores convencionales reside en que los primeros trabajan —como su nombre lo indica— con flujo laminar (número de Reynolds, $Nr < 500$) y los últimos con flujo turbulento (Nr entre 10.000 y 250.000). Esta diferencia teórica fundamental debe reflejarse en la forma como se diseñan unos y otros (2).

2.1 Parámetros y recomendaciones generales de diseño

- El parámetro de diseño más importante en las unidades de decantación es la velocidad de sedimentación de los flóculos, que depende fundamentalmente de las características del agua cruda y de la eficiencia del pretratamiento. Por esta razón, la velocidad de diseño debe determinarse experimentalmente para cada caso. Véase la metodología para su determinación en *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*, tomo II, capítulo 11.
- Las cargas superficiales utilizadas en América Latina normalmente varían entre 120 y 185 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, con eficiencias de remoción por encima del 90% (8). En cada caso, es necesario efectuar un estudio de tratabilidad del agua, para determinar la tasa de decantación con la cual se podrán obtener 2 UN de turbiedad residual en el efluente. Este criterio obedece a recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para que los filtros puedan brindar un efluente exento de microorganismos patógenos y de huevos de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium*, habida cuenta de que solo el filtro puede eliminar a estos últimos cuando recibe un afluente de la calidad indicada (3).
- De acuerdo con investigaciones realizadas en prototipos, las unidades se pueden diseñar con Nr de hasta 500, sin que se obtengan disminuciones apreciables en la eficiencia alcanzada (1).
- En los decantadores laminares, el Nr es una consecuencia de la geometría de los elementos tubulares y de la velocidad del flujo en el interior de estos, y no una condición del proyecto (1). De acuerdo con este criterio —que se va corroborando con la experiencia práctica indicada en el ítem anterior— no es necesaria la obtención de un flujo laminar puro para mejorar la eficiencia del proceso.

- Al utilizarse el Nr en el límite máximo del rango laminar, se consigue ampliar la separación de las placas o la sección de los módulos, lo cual se refleja en una gran economía, al disminuir el número de placas o módulos empleados en la construcción de la unidad.
- La velocidad longitudinal media (V_0) en los elementos tubulares comúnmente se adopta entre 10 y 25 cm/min. En cada caso, es posible determinar la velocidad máxima del flujo mediante la expresión (1):

$$V_0 \text{ máx.} = [Nr / 8]^{0.5} \cdot V_{sc}$$

Donde V_{sc} = velocidad de sedimentación de las partículas

- Dada la gran cantidad de módulos que se precisan, es deseable que el material sea de bajo costo y muy resistente a la permanencia bajo el agua. Los materiales que se usan para este fin son las lonas de vinilo reforzadas con poliéster, el asbesto-cemento, el plástico y la fibra de vidrio.

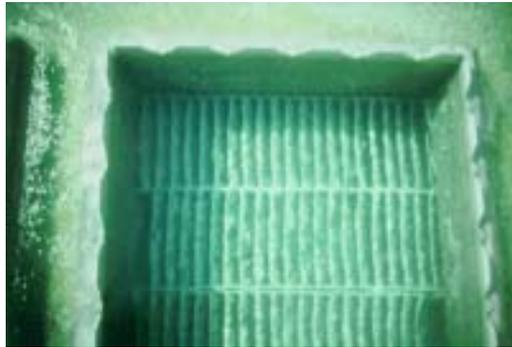


Figura 4-2. Módulos de decantación de fibra de vidrio (4)

- Las lonas de vinilo reforzadas con hilos de poliéster de alta tenacidad son el material más usado actualmente por sus grandes ventajas: no producen pérdidas por rotura, el sistema de instalación es más sencillo y su duración es muchísimo mayor. Es un material muy confiable en zonas de alto riesgo sísmico.
- Tradicionalmente, en este tipo de unidades se han venido utilizando las planchas de asbesto-cemento por su alta disponibilidad, bajo costo y resistencia a la corrosión, con las siguientes dimensiones: 1,20 metros de alto por 2,40 metros de largo, con espesores de un centímetro o de 6 y 8 milímetros, siempre y cuando hayan sido fabricadas con fibras largas de asbesto. Las restricciones de calidad de agua para su empleo son las mismas que se dieron en el capítulo anterior.

- También se utilizan módulos de plástico y de fibra de vidrio prefabricados por su facilidad de instalación. Al elegir el plástico, debe consultarse con el fabricante su resistencia a la exposición directa a los rayos solares. Los módulos prefabricados, tanto los de plástico como los de fibra de vidrio, normalmente son muy delgados y se destruyen fácilmente al ser sometidos a una operación normal de lavado con agua a presión. En la foto de la figura 4-2 se puede percibir que con solo dos meses de operación los módulos de fibra de vidrio ya empiezan a deformarse y en la figura 4-3 se puede ver cómo terminan los de plástico al cabo de unos años.



Figura 4-3. Módulos de decantación de plástico deteriorados (4)

3. DECANTADORES DE FLUJO ASCENDENTE

Para optimizar el funcionamiento de estas unidades, debemos considerar en el proyecto estructuras de entrada, salida, almacenamiento y extracción de lodos correctamente concebidas, a través de las cuales se debe vehicular el agua para lograr el mejor comportamiento y la máxima eficiencia de la unidad. Múltiples evaluaciones han permitido determinar que la eficiencia de este tipo de decantador está estrechamente ligada al comportamiento hidráulico de la unidad.

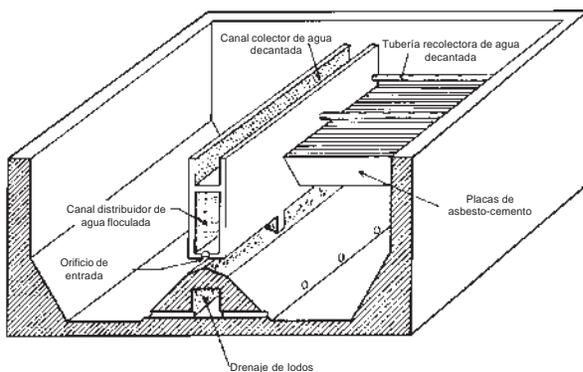


Figura 4-4. Decantador de placas de flujo ascendente (2)

Zona de entrada. Canal o tubería que distribuye de manera uniforme el agua floculada al módulo de placas. Véase el segundo piso del canal central en la figura 4-4.

Zona de decantación. Mediante pantallas paralelas de lona, planchas de asbesto-cemento, fibra de vidrio, etcétera.

Zona de salida. Sistema de recolección del agua decantada mediante canaletas, tuberías perforadas (véase la figura 4-4) o vertederos perimetrales, dependiendo del tamaño o capacidad de la unidad.

Zona de depósito y extracción de lodos. Tolvas de almacenamiento continuas y múltiples. Sistema hidráulico de extracción uniforme de lodos, mediante colector múltiple y sifones.

4. ZONA DE ENTRADA

Esta zona tiene como objetivo distribuir el caudal de manera uniforme a todas las unidades que operan en paralelo y a lo largo del módulo de placas. Esta función la desempeñan dos canales con diferente ubicación.

4.1 Criterios de diseño

- Si se proyectan canales de sección variable, se consigue distribuir el caudal de manera uniforme a varias unidades, para que la velocidad se mantenga constante.
- La sección del canal puede tener ancho constante y profundidad variable o ancho variable y profundidad constante. Los canales del primer tipo son los más convenientes porque permiten compactar más el área de la planta. La figura 4-5 muestra un canal de ancho variable. En plantas grandes el ancho de este canal puede ser de varios metros, por lo que resulta muy conveniente que tenga un ancho constante y que la mayor dimensión esté en la profundidad, aprovechando la excavación que inevitablemente se hará para la construcción del decantador.
- Se puede admitir una desviación de caudales de 5% entre la primera y la última compuerta u orificio lateral de distribución, lo cual se comprueba mediante la aplicación de los criterios de Hudson (5).

- El coeficiente de pérdida de carga total en las compuertas (β) está dado por la siguiente expresión:

$$\beta = 1 + \theta + (V_c / VL)^2 \cdot \varphi \quad (1)$$

Donde:

- 1 = pérdida de carga debida a la disipación de energía en el lateral
- θ = coeficiente de pérdida de carga en la entrada. En canales cortos como los que se diseñan en las plantas de tratamiento de agua, el valor de este coeficiente es de $\theta = 0,7$
- φ = coeficiente de pérdida de carga en el cambio de dirección de la corriente, $\varphi = 1,67$
- V_c = velocidad en el canal o tubo principal de distribución en m/s
- VL = velocidad en los laterales: compuertas o tuberías laterales que reciben el caudal distribuido en m/s

- La velocidad real en los laterales (VL_l) se comprueba mediante la siguiente expresión:

$$VL = \frac{Qt}{AL \cdot \sqrt{\beta_1} \left(\sum_{i=1}^n 1 / \sqrt{\beta_i} \right)} \quad (2)$$

Donde:

- Qt = caudal total por distribuir (m^3/s)
- AL = área de cada uno de los orificios de las compuertas o de los tubos laterales de distribución (m^2)

- Para comprobar el gradiente de velocidad medio (G) en los orificios o secciones de paso, se empleará la siguiente expresión (6):

$$G = (\gamma/2\mu g)^{0,5} \cdot (f/4 R_H)^{0,5} \cdot VL^{1,5} \quad (3)$$

Donde:

- γ = densidad del agua en kg/cm^3
- R_H = radio hidráulico de la sección en m

- μ = viscosidad absoluta ($\text{kg/cm}^2 \times \text{seg}$)
- f = coeficiente de Darcy-Weisbach: varía entre 0,015 y 0,030

$$hf = \beta VL_n^2 / 2g \quad (4)$$

- hf = pérdida de carga en m
- VL_n = velocidad real en el lateral número n en m/s.



Figura 4-5. Canal de distribución a varios decantadores (4)

Aplicación 1. Canal de distribución uniforme del agua floculada a los decantadores.

- Todos los decantadores que operan en paralelo deben tener un comportamiento similar. Esto solo ocurrirá si todos reciben caudales iguales para que la tasa de operación sea uniforme.
- El cuadro 4-1 muestra un ejemplo de aplicación al diseño de un canal que distribuye $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a cinco decantadores; se admite una desviación de hasta 5% (figura 4-6). Este diseño se comprobó y la desviación de la velocidad en las compuertas de paso dio 4,2%, menor de 5% y, por lo tanto, aceptable (cuadro 4-2).

Cuadro 4-1. Dimensionamiento del canal de agua floculada (4)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal	$Q = 0,500$	m^3/s	$q = Q/N$	$q = 0,50/5$ $q = 0,10$	Caudal de ingreso a cada decantador	m^3/s
2	N.º de decantadores	$N = 5$	constante				
3	Ancho del canal	$B = 1,50$	m	$A_F = H_F \cdot B$	$A_F = 0,60 (1,50)$ $A_F = 0,90$	Sección final del canal	m^2
4	Altura mínima	$H_F = 0,60$	m				
5				$V_c = q/A_F$	$V_c = 0,100 / 0,90$ $V_c = 0,11$	Velocidad en la sección final del canal	m/s
6	Velocidad en la sección inicial	$V_i = 0,145$	m/s	$A_i = Q/V_i$ $H_i = A_i/B$	$A_i = 0,500/0,145$ $A_i = 3,45$ $B_i = 3,45/1,50 = 2,30$	Sección inicial del canal Altura inicial del canal	m^2 m
7	Velocidad en los laterales	$VL = 0,28$	m/s	$A_L = q / VL$	$A_L = 0,100/0,28$ $A_L = 0,36$ $b = 0,60$; $h = 0,60$	Sección útil de las compuertas	m^2
8	Coefficientes experimentales de Hudson	$\epsilon = 0,70$ $\phi = 1,67$		$\beta_i = 1 + \epsilon + \phi [V_c / VL]^2$	$\beta_i = 1 + 0,7 + 1,67 [0,145/0,28]^2$ $\beta_i = 2,148$ $\sqrt{\beta_i} = 1,466$	Coefficiente de pérdida de carga en los orificios de las compuertas	constante
9	Del cuadro 4-2	$\sum \sqrt[4]{\beta} = 3,467$		$VL_i = Qt / AL \cdot \sqrt{\beta_i}$ $\sum \sqrt[4]{\beta}$	$VL_i = 0,500 / (0,36) \cdot (1,466)(3,467)$ $VL_i = 0,273$	Velocidad real en la primera compuerta	m/s

Cuadro 4-1.1. Dimensionamiento del canal de agua floculada (continuación)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
10	Del cuadro 4-2	$\beta_3 = 1,963$			$VL_5 = 0,500 / (0,36) \cdot (1,401) (3,467)$ $VL_5 = 0,288$	Velocidad real en la última compuerta	m/s
				$\ddot{a} = (VL_5 - VL_1) / VL_5$	$\ddot{a} = (0,288 - 0,276) / 0,288$ $\ddot{a} = 4,2\% ; \ddot{a} < 5,0\%$	Desviación de caudal aceptable	
				$h_f = \beta VL_5^2 / 2g$	$h_f = 1,96 (0,288)^2 / 19,6$ $h_f = 0,008$	Pérdida de carga en las compuertas	m
11	Ancho de sección Profundidad de sección	$b = 0,60$ $a = 0,60$	m m	$R_H = (axb) / 2(a+b)$	$R_H = (0,60 \times 0,60) / 2(0,60 + 0,60)$ $R_H = 0,15$	Radio hidráulico de una compuerta	m
12	Coef. Darcy	$f = 0,02$		$G = (\ddot{a} / 2ig)^{0,5} \cdot (f / 4 R_H)^{0,5} \cdot VL_5^{1,5}$	$G = (2,955 / (1 / 19,6))^{0,5} \times [0,02 / 4 (0,15)^{0,5} (0,288)^{1,5}]$ $G = 18,8$	Gradiente de velocidad al paso del flujo por las compuertas	s ⁻¹
13	$\sqrt{\ddot{a}\bar{n}} =$	2,955					
14	Velocidad de la compuerta número 5	$VL_5 = 0,288$					

Cuadro 4-2. Comprobación de la desviación del caudal en el canal de distribución de agua floculada a varios decantadores en paralelo (4)

N.º	Q (m³/s)	X (m)	Hx (m)	Ax (m²)	Vc (m/s)	Vc/VL	\sqrt{B}	$1/\sqrt{B}$	VL (m/s)
1	0,500	0	2,30	3,45	0,145	0,52	1,466	0,682	0,276
2	0,400	6,05	1,88	2,81	0,142	0,51	1,460	0,685	0,277
3	0,300	12,10	1,45	2,18	0,138	0,49	1,451	0,689	0,278
4	0,200	18,15	1,03	1,54	0,130	0,46	1,435	0,697	0,281
5	0,100	24,20	0,60	0,90	0,111	0,40	1,401	0,714	0,288

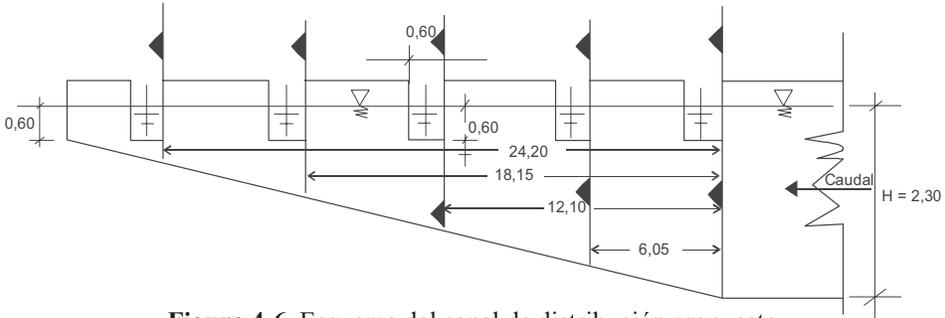


Figura 4-6. Esquema del canal de distribución propuesto en el ejemplo del cuadro 4-2 (4)

Aplicación 2. Canal longitudinal de distribución uniforme al módulo de placas

Este canal se dimensiona con los mismos criterios empleados en el cálculo anterior. La longitud total del canal es la del módulo de placas calculado en el cuadro 4-7. La altura máxima de 2,09 metros se determina en el esquema de la figura 4-7 y la altura mínima de 0,60 metros, con criterios constructivos (figura 4-8).

Adoptando un ancho de canal de 0,65 metros, se consideraron los orificios ubicados en el fon-

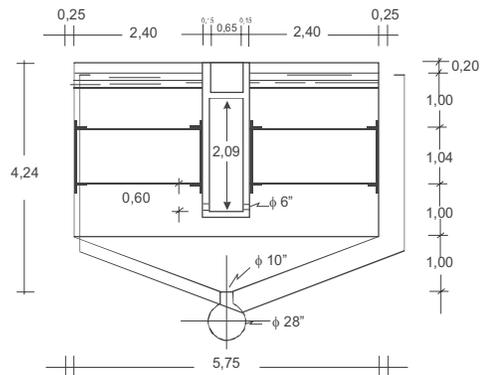


Figura 4-7. Canal de distribución longitudinal al módulo de placas (4)

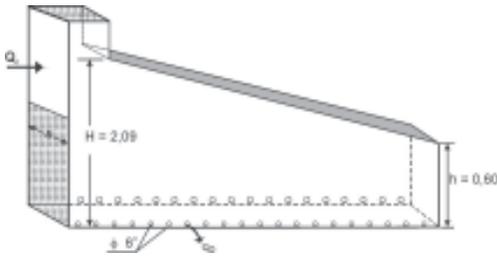


Figura 4-8. Forma del canal central de distribución de agua flocculada a lo largo del módulo de placas (4)

do y a ambos lados del canal, con una distancia de centro a centro de 0,50 metros. Podemos ver la forma de este canal en la figura 4-8. Véase el procedimiento de cálculo en el cuadro 4-3.

Aplicación 3. Distribución mediante tuberías

pequeños, en lugar de canales, se emplean tuberías de PVC con perforaciones y se calcula la relación entre el diámetro de la tubería y los orificios con criterios de distribución uniforme. Véanse las figuras 4-9 y 4-10. Consideraremos para el estudio de caso un decantador con capacidad para producir 10 L/s. Véase el cuadro de cálculo 4-5.

Cuando se proyectan decantadores

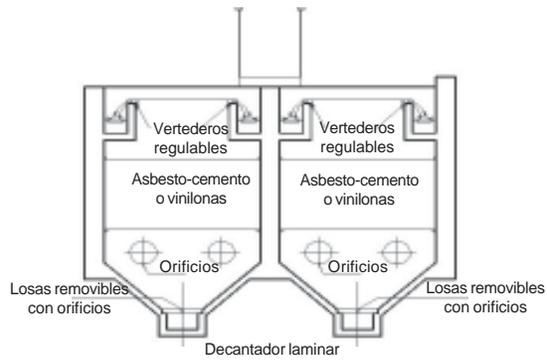


Figura 4-9. Solución para decantadores laminares de pequeña capacidad (4)

En la figura 4-10 se presenta un corte longitudinal del decantador pequeño. Las tube-

rías que se utilizan para distribuir el agua flocculada son de PVC y los decantadores deben proyectarse con la longitud máxima que da el tubo.

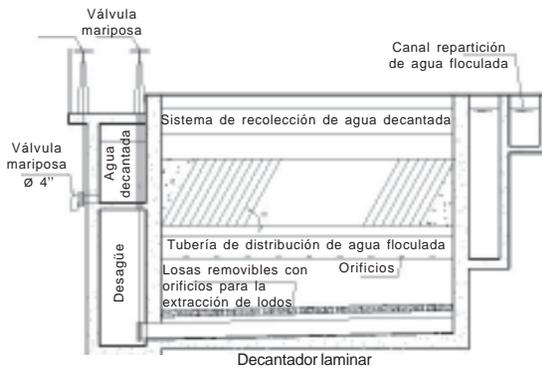


Figura 4-10. Decantador laminar con distribución de agua flocculada mediante tuberías (4)

Cuadro 4-3. Dimensionamiento del canal central de distribución de agua floculada (4)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal de un decantador en condiciones normales de operación	$Q = 0,100$	m^3/s	$Q_c = 1,25 Q$ $Q_c = 1,25 (0,100); Q_c = 0,125$	Caudal del canal durante el mantenimiento de una unidad	m^3/s
				$Q_c / 2 = Qd = 0,125/2 = 0,0625$	Caudal de la mitad del canal	m^3/s
2	Velocidad en los orificios	$VL = 0,14$	m/s	$AT = Qd / VL$ $AT = 0,0625 / 0,14$ $AT = 0,446$	Área total de orificios	m^2
3	Separación de centro a centro entre orificios	$a = 0,50$	m	$N = (L - 2d) / 0,50;$ $N = 11,50 / 0,50;$ $N = 23$	Número de orificios a cada lado del canal	unidades
4	Longitud total del canal	$L = 12$	m			
5	Distancia entre la pared y el primer orificio	$D = 0,25$	m	considerando un orificio al inicio (distancia cero) en total son $N=24$ orificios a cada lado del canal		
6				$A_L = AT/N$ $A_L = 0,446/24; A_L = 0,019$	Área de cada orificio	m^2
7				$d = \sqrt{A_L \times 4 / \pi}$ $d = \sqrt{0,019 \times 4 / 3,1416} = 0,15$ $d = 6''$	Diámetro de los orificios	m^2
8	Ancho del canal	$B = 0,65$	m	$A_F = B \cdot h$ $A_F = 0,65(0,60)$	Sección en el extremo final del canal	m^2
9	Altura mínima	$h = 0,60$	m	$A_F = 0,39$		
10				$q_0 = Qd / N$ $q_0 = 0,0625 / 24$ $q_0 = 0,003$	Caudal por orificio	m^3/s
11				$Q_F = 2q_0$ $Q_F = 0,006$	Caudal que llega al extremo final del canal	m^3/s
12				$V_F = Q_F / A_F$ $V_F = 0,006/0,39$ $V_F = 0,013$	Velocidad en el extremo final del canal	m/s

Cuadro 4-3. Dimensionamiento del canal central de distribución de agua floculada (continuación)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Cálculos	Resultados	Unidad
13	Altura máxima del canal	$H = 2,09$	m	$A_c = B \cdot H$ $A_c = 1,359$ $A_c = 0,65 (2,09)$	Sección inicial del canal	m ²
14	Coefficientes experimentales	$\delta = 0,70$ $\theta = 1,67$		$V_c = Q_c / A_c$ $V_c = 0,125 / 1,359$ $V_c = 0,09$ $\beta = 1 + \theta + \theta [V_c / VL]^2$ $\beta_1 = 1 + 0,7 + 1,67 [0,05 / 0,14]^2$ $\beta_1 = 1,88$ $\beta_{10} = 1 + 0,7 + 1,67 [0,013^2 / 0,14]$ $\beta_{10} = 1,714$	Velocidad en el extremo inicial Coeficiente de pérdida de carga total en el primer orificio del canal Coeficiente de pérdida de carga en el último orificio del canal	m/s
15	Del cuadro 4-4 $\Sigma 1/\beta =$	$17,86$		$VL_1 = QT / AL \cdot \sqrt{\beta} \cdot \Sigma 1/\beta$ $VL_1 = 0,0625 / 0,019 (1,37) (17,86)$ $VL_1 = 0,137$ $VL_2 = 0,0625 / (0,019) (1,31) (17,86)$ $VL_2 = 0,144$	Velocidad real en el primer orificio Velocidad real en el último orificio	m/s
16	$T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	$\sqrt{\gamma/\mu} = 2,920$		$\delta = VL_2 \cdot VL_1 / VL_2$ $\delta = 0,144 - 0,0137 / 0,144$ $\delta = 4,81\%$	Desviación de caudal entre el primer y el último orificio	
17	Coefficiente Darcy Weisbach	$F = 0,02$		$G = (\gamma/24g)^{0,5} \cdot (f/4 R)^{0,5} \cdot VL^{1,5}$ $G = 2,920 (1/19,6)^{0,5} \cdot VL^{1,5}$ $[0,02 / (1/0,15)]^{0,5} \cdot 0,14^{1,5}$ $G = 12$	Gradiente de velocidad en los orificios	s ⁻¹

Cuadro 4-4. Dimensionamiento de tuberías de distribución de agua floculada a lo largo del módulo de placas (4)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal por decantador	$Q = 0,010$	m^3/s	$At = Q/2 (VL); At = 0,010/2(0,14)$ $At = 0,036$	Área total de orificios por tubería	m^2
2	Velocidad en los orificios	$VL = 0,135$	m/s			
3	Longitud del módulo de placas y de la tubería	$L = 4,0$	m	$n = L/e$ $n = 4/0,5$ $n = 8$	Número de orificios por tubo de distribución	unidad
4	Separación de los orificios	$e = 0,50$	m			
5				$Ao = At/n; Ao = 0,036/8$ $Ao = 0,004$ $D = 3''$	Diámetro de los orificios	pulgadas
6	Diámetro de la tubería de distribución	$D = 16''$ $D = 0,40$	pulgadas m	$Ac = \pi D^2/4$ $Ac = \pi (0,40)^2/4$ $Ac = 0,129$ $nAo/Ac = 8(0,004) / 0,129 = 0,25$ para que $\theta < 5\%$ $nAo/Ac < 0,46$	Área de la tubería de distribución La desviación que se producirá es menor de 5%; por lo tanto, con dos tuberías de 16'', se conseguirán magníficos resultados	m^2
7	Relación de $\sqrt{\gamma/\mu}$ para una temperatura de 15 °C	2.920		$G = (\gamma/24g)^{0,5} \cdot (f/4 R_{pf})^{0,5} \cdot VL^{1,5}$ $G = 2.920 (1/19,6)^{0,5} \cdot (0,02/0,40)^{0,5} \cdot 0,135^{1,5}; G = 18 s^{-1}$	Gradiente de velocidad en los orificios	s^{-1}
8	Coefficiente Darcy Weisbach	0,02	unidad			

Cuadro 4-5. Cálculo de $\Sigma 1/\sqrt{\beta}$ en el dimensionamiento del canal interior de distribución de agua floculada al módulo de decantación

N.º de orificios	Q (m³/s)	X (m)	BX (m)	Área (m²)	VC (m/s)	Vc/VL	$\sqrt{\beta}$	$1/\sqrt{\beta}$	VL (m/s)
1	0,063	0,00	2,09	1,36	0,046	0,33	1,37	0,73	0,137
2	0,060	0,50	2,03	1,32	0,045	0,32	1,37	0,73	0,137
3	0,057	1,00	1,97	1,28	0,045	0,32	1,37	0,73	0,138
4	0,055	1,50	1,90	1,24	0,044	0,32	1,37	0,73	0,138
5	0,052	2,00	1,84	1,19	0,044	0,31	1,36	0,73	0,138
6	0,049	2,50	1,77	1,15	0,043	0,31	1,36	0,73	0,138
7	0,047	3,00	1,71	1,11	0,042	0,30	1,36	0,73	0,138
8	0,044	3,50	1,64	1,07	0,041	0,30	1,36	0,74	0,138
9	0,042	4,00	1,58	1,03	0,041	0,29	1,36	0,74	0,139
10	0,039	4,50	1,51	0,98	0,040	0,28	1,35	0,74	0,139
11	0,036	5,00	1,45	0,94	0,039	0,28	1,35	0,74	0,139
12	0,034	5,50	1,38	0,90	0,038	0,27	1,35	0,74	0,139
13	0,031	6,00	1,32	0,86	0,037	0,26	1,35	0,74	0,140
14	0,029	6,50	1,25	0,81	0,035	0,25	1,34	0,74	0,140
15	0,026	7,00	1,19	0,77	0,034	0,24	1,34	0,75	0,140
16	0,023	7,50	1,12	0,73	0,032	0,23	1,34	0,75	0,141
17	0,021	8,00	1,06	0,69	0,030	0,22	1,33	0,75	0,141
18	0,018	8,50	0,99	0,64	0,028	0,20	1,33	0,75	0,141
19	0,016	9,00	0,93	0,60	0,026	0,19	1,33	0,76	0,142
20	0,013	9,50	0,86	0,56	0,023	0,17	1,32	0,76	0,142
21	0,010	10,00	0,80	0,52	0,020	0,14	1,32	0,76	0,143
22	0,008	10,50	0,73	0,47	0,016	0,12	1,31	0,76	0,143
23	0,005	11,00	0,67	0,43	0,012	0,09	1,31	0,76	0,144
24	0,003	11,50	0,60	0,39	0,007	0,05	1,31	0,77	0,144
$\Sigma 1/\sqrt{\beta}$								17,86	

5. ZONA DE SEDIMENTACIÓN

5.1 Criterios específicos

- Esta zona se proyecta sobre la base de la tasa de decantación seleccionada durante el estudio de laboratorio efectuado con el agua cruda. La muestra debe tomarse durante el periodo lluvioso, para que los resultados de estas pruebas, que constituyen los parámetros de diseño del proyecto, correspondan a las necesidades de la época más crítica.



Figura 4-11. Zona de decantación mediante módulos de asbesto-cemento (4)

- Las lonas que se utilizan como placas son de vinilo y reforzadas con hilos de poliéster de alta tenacidad (KP 500 ó 1.000), recubiertas por ambos lados con PVC de formulación especial; con bastas en todo el contorno y cabos o refuerzos metálicos internos, por lo menos en los laterales y en la parte inferior. Estarán provistas de ojalillos de aluminio en las cuatro esquinas, los que servirán para templarlas y fijarlas convenientemente, mediante pasadores de plástico, a perfiles de aluminio, ubicados en las paredes de los canales laterales. Véase el detalle de la instalación en la figura 4-12.

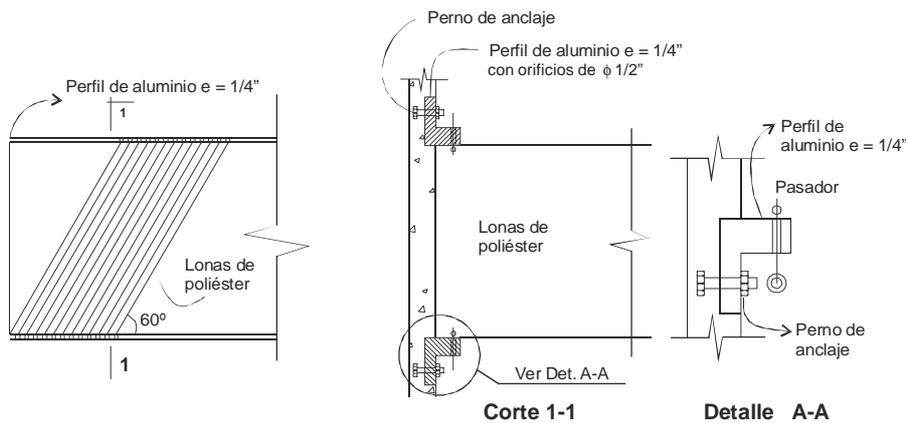


Figura 4-12. Instalación de las lonas de vinilo (4)

- Los perfiles de aluminio que se empotran en las paredes laterales son de 90° , $1/4"$ de espesor y 5 centímetros de ancho con orificios de un centímetro de diámetro, separados a partir del extremo de acuerdo con el espaciamiento calculado en el proyecto (10, 12 ó 14 centímetros). El perfil superior se ubicará a 1,30 metros del borde superior del decantador, de tal manera que el nivel máximo del módulo de decantación tenga un metro de sumergencia. Las lonas se instalarán formando un ángulo de 60° con el plano horizontal, por lo que el perfil inferior se colocará paralelo al anterior, a una distancia de 1,04 metros y con los orificios dispuestos en forma similar.

- Las láminas de asbesto-cemento de 6 milímetros de espesor y 2,40 metros de largo se pandean y producen una flecha de hasta 5 centímetros cuando están inclinadas a 60° y soportadas solo en sus extremos.

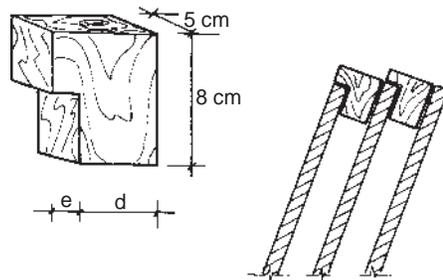


Figura 4-13. Separadores para placas de asbesto-cemento (7)

- Esto se resuelve colocando uno o dos separadores al centro de las placas, de forma que se apoyen unas sobre las otras, con lo que se evita una deflexión excesiva. Estos separadores pueden ser de madera o de asbesto-cemento (figura 4-13).

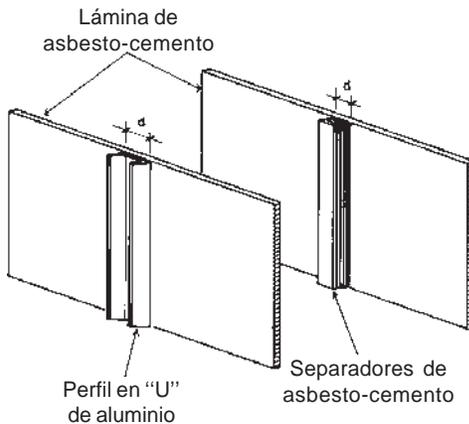


Figura 4-14. Otros tipos de separadores de placas (7)

- Los separadores de asbesto-cemento constan de tiras de 5 a 6 centímetros de ancho y 10 milímetros de espesor, adheridas con pegamento a las láminas para su mayor estabilidad. También se usan perfiles en "U", asegurados con tornillos, aunque es suficiente la sola presión de una placa sobre la otra para conservar los separadores en su posición (figura 4-14).

- El apoyo de las placas en sus extremos se ha efectuado de varias formas. Una de las más difíciles de llevar a la práctica, dependiendo de la calidad de mano de obra disponible, consiste en efectuar ranuras longitudinales de 4 a 5 centímetros de profundidad e inclinadas en 60°, en los muros que limitan el ancho de la zona de decantación.

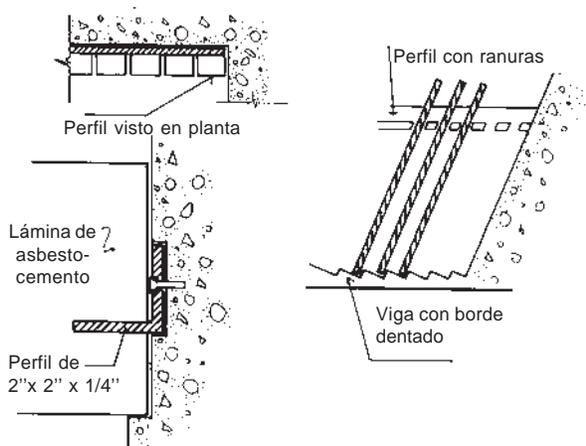


Figura 4-15. Detalle de instalación de placas de asbesto-cemento con perfiles (4)

- Otro sistema de colocación de placas consiste en empotrar un perfil de 2" x 2" x 1/4", debidamente protegido contra la corrosión, con ranuras convenientemente dispuestas para sujetar las láminas en la parte superior. Se dejará una saliente de unos 10 centímetros en los muros para sujetar las láminas en el extremo inferior (figura 4-15).

En algunos casos, solamente se colocarán apoyadas en la parte baja y con separadores en el medio de las láminas.

- En plástico se han adoptado las formas tubulares de sección cuadrada, hexagonal o circular, que constituyen los denominados *módulos patentados* (figuras 4-16).
- Los módulos patentados se fabrican normalmente de plástico o de fibra de vidrio. El plástico es el material ideal para este fin por su poco peso. Como su costo es muy alto, los módulos de este material tienen de 0,50 a 0,60 metros de altura y están hechos de láminas muy delgadas para disminuir su peso y, por consiguiente, también el costo de transporte.

- Los módulos dan mayor resistencia estructural al conjunto, pero hidráulicamente tienen desventajas con respecto a las placas. A igualdad de condiciones (inclinación y longitud relativa), las secciones tubulares cuadradas o circulares producen cargas superficiales equivalentes más altas que las de placas. Debido a la poca altura de los módulos, decrece el valor de la profundidad relativa del decantador, que es de 10 a 12 en este caso, mientras que con las placas es de 20 a 24, lo cual incrementa la tasa superficial de la unidad en 50 a 60% por este solo concepto.

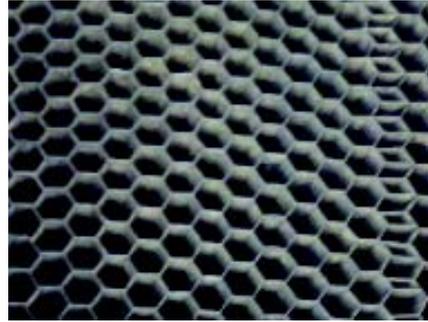


Figura 4-16. Módulos de decantación de sección hexagonal (4)

5.2 Criterios para el dimensionamiento

- El área total que debe cubrirse con placas espesor (e) y separación (e'), en el plano horizontal, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$A_s = Q / fV_s \quad (5)$$

$$f = \text{sen } \theta (\text{sen } \theta + L \text{ Cos } \theta) / s$$

Donde:

- Q = caudal en m³/ds
- V_s = velocidad de sedimentación de la partícula en m/s
- L = longitud relativa
- S = módulo de eficiencia de placas

- La longitud relativa L se determina mediante la siguiente expresión:

$$L = lu / d \quad (6)$$

Donde:

- lu = longitud útil dentro de las placas
- d = espaciamento entre las placas

- El número total de placas por instalar (N) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$N = A_s \text{ sen } \theta / B d \quad (7)$$

Donde:

B = Ancho total neto de la zona de decantación

- El número de Reynolds se comprueba mediante la siguiente expresión:

$$Nr = 4 RH \cdot V_o / \nu \quad (8)$$

Donde:

ν = viscosidad cinemática en m^2/s
 V_o = velocidad media del flujo en m/s
 RH = radio medio hidráulico en m

5.3 Aplicación

Siguiendo con el ejemplo inicial, pasaremos a calcular una unidad para 100 L/s de capacidad. Se efectuaron los estudios de laboratorio con una muestra de 550 UNT, representativa de las condiciones más críticas, y se obtuvo la curva de decantación indicada en la figura 4-17.

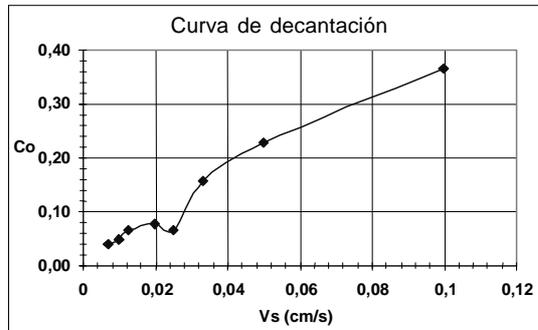


Figura 4-17. Curva de decantación (4)

A partir de la curva de decantación, se desarrolló el cuadro 4-6. Entrando en la curva con los valores de velocidad de sedimentación correspondientes al rango de tasas de la primera columna del cuadro, se van obteniendo los valores de $C_o = T_f/T_o$, con los que se calculan las columnas siguientes (véase *Tratamiento de agua para consumo humano. Planta de filtración rápida. Manual I: Teoría*, tomo II, capítulo 11).

Cuadro 4-6. Selección de la velocidad óptima de decantación (4)

Q m ³ /m ² /d	Vs cm/s	Co %	Rt UNT	Tr UNT	Tf UNT
25	0,029	0,15	0,999	179,75	0,25
28,5	0,033	0,16	0,996	179,35	0,65
30	0,035	0,175	0,994	178,84	1,16
35	0,040	0,18	0,991	178,31	1,69
36	0,042	0,185	0,989	178,00	2,00
37	0,043	0,19	0,987	177,74	2,26
40	0,046	0,22	0,979	176,30	3,70

Del análisis del cuadro anterior se determinó que la tasa de decantación con la que se podía obtener un efluente con 2 UNT era de 36 m³/m².d.

Dado que esta tasa se obtuvo en el laboratorio en condiciones ideales, se aplicó un coeficiente de seguridad de 1,3, con el que se obtuvo una tasa de 27,7 m³/m².d. Durante el cálculo, esta tasa se incrementó a 28,74 m³/m².d para redondear la longitud del decantador a 12 metros. Véase un ejemplo de cálculo de la unidad en el cuadro 4-7.

Cuadro 4-7. Dimensionamiento de un decantador de placas paralelas (4)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Separación de las placas en el plano horizontal	$e' = 12$	cm	$d = e' \operatorname{sen} \theta - e$ $d = 12 \operatorname{sen} \theta - 0,06$ $d = 10,33$	Espaciamiento entre las placas	cm
	Espesor de las lonas de vinilo	$e = 0,06$	cm			
	Ángulo de inclinación de las placas	$\theta = 60$	°			
2	Longitud del módulo de placas	$l = 1,20$	m	$lu = l - e' \cos \theta$ $lu = 120 - 12 \cos 60^\circ$ $lu = 114$	Longitud útil dentro de las placas	cm
				$L = lu / d$ $L = 114 / 10,33$ $L = 11,03$		
3	Módulo de eficiencia de las placas	$S = 1$		$f = [\operatorname{sen} \theta (\operatorname{sen} \theta + L \cos \theta)] / S$	Coeficiente del módulo de placas	
	Velocidad de sedimentación de las partículas	$V_s = 3,33(10)^{-4}$	m/s	$f = [0,866(0,866 + 11,03 \times 0,5)] / 1$ $f = 5,53$; $As = Q / f V_s$; $As = 0,100 / 5,53 \times 3,33(10)^{-4}$ $As = 54,41$		
	Caudal de diseño del decantador	$Q = 0,100$	m ³ /s			
4	Ancho total neto de la zona de decantación	$B = 4,8$	m	$N = As \operatorname{sen} \theta / B \cdot d$ $N = [54,41(0,866) / 4,80(10,33)] \times 100$ $N = 95$	Número de canales formados por las placas	

Cuadro 4-7. Dimensionamiento de un decantador de placas paralelas (continuación)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Cálculos	Resultados	Unidad
5				$LT = L \cos \theta + [Nd + (N+1)e] / \sin \theta$ $LT = [1,2(0,5) + 95(0,1033) + (95+1)0,0006] / (0,866)$ $LT = 12$	Longitud total del decantador	m
6				$V_0 = Q / A_s \sin \theta$ $V_0 = [0,100 / (154,41(0,866))] \cdot 100$ $V_0 = 0,21$	Velocidad media del flujo	cm/s
7	Ancho del módulo de placas	$b = 2,4$	m	$RH = b \cdot d / 2(b+d)$ $RH = (2,40)(0,103) / (100)$ $RH = 2(2,40 + 0,103)$ $RH = 4,95$	Radio hidráulico del módulo de placas	cm
8	Viscosidad a 10 °C	$V = 0,013$	cm ² /s	$Nr = 4 RH \times V_0 \nu$ $Nr = 4(4,95)(0,21) / (0,013)$ $Nr = 320$	Número de Reynolds	
9				$V_0 = [NR/8]^{0,5} V_{0c}$ $V_0 = [323/8]^{0,5} (0,033)$ $V_0 = 0,21$	Velocidad longitudinal máxima	cm/s

6. ZONA DE SALIDA

6.1 Criterios generales

- La uniformidad en la ascensión del flujo depende tanto de las características de la zona de entrada como de la de salida.

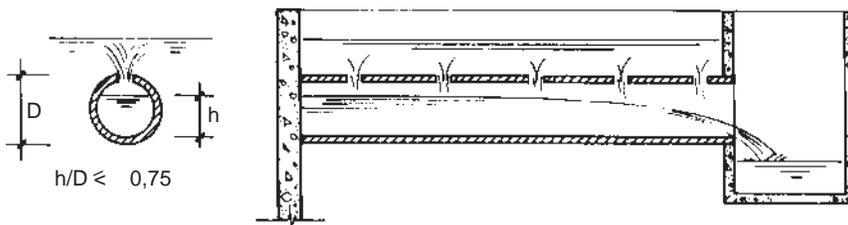


Figura 4-18. Canal central y tuberías laterales de recolección de agua decantada (6)

- Para conseguir una extracción uniforme, se puede diseñar ya sea un canal central recolector y canales laterales (figura 4-18), un canal central y tuberías laterales perforadas o un canal central y vertederos laterales (figura 4-19).

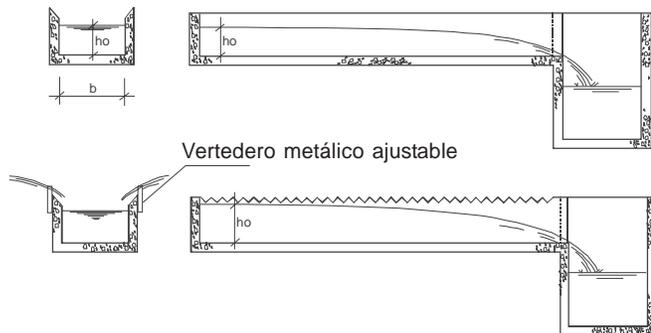


Figura 4-19. Vertederos de recolección regulables (6)

- No es recomendable diseñar vertederos fijos de bordes lisos, porque cualquier desigualdad en los bordes produce apreciables desigualdades en la cantidad de agua extraída.

En los bordes de los vertederos de concreto deben empernarse láminas de acero o PVC dentadas (con vertederos en ve) o de bordes lisos, que trabajen con tirantes de agua de 5 a 10 centímetros. Esta solución permitirá nivelarlos en obra (figura 4-19).

- Tubos con perforaciones en la parte superior dan excelentes resultados cuando todos los orificios son de igual diámetro, con una carga de agua sobre estos de 5 a 10 centímetros y descarga libre hacia un canal central o canales laterales; el tubo no debe trabajar a sección llena. Esta última condición es básica para obtener una extracción equitativa del flujo.

6.2 Criterios para el dimensionamiento

- La longitud de vertederos de recolección (l_v) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$l_v = Q/q_r \quad (9)$$

Donde:

- Q = caudal de diseño del decantador en L/s
 q_r = tasa de diseño de los vertederos, que varía entre 1,1 y 3,3 $L/s \times m$ de longitud de vertedero.

Los valores de q_r cercanos a 1,10 $L/s \times m$ se recomiendan para flóculos débiles o para plantas con operación poco confiable, y valores cercanos a 3,30, para casos de flóculos grandes, pesados y con buen nivel de operación.



Figura 4-20. Sistema de recolección mediante tuberías perforadas (4)

- La distancia máxima entre los vertederos de recolección (d) es una función de la profundidad (h) de instalación de los módulos o placas, y es inversamente proporcional a la tasa de escurrimiento superficial.

$$d/h = 432/V_s \quad (10)$$

Donde:

V_s = velocidad ascensional del agua o tasa de escurrimiento superficial en $m^3/m^2/d$

En el gráfico de la figura 4-21 se encuentra representada la variación de d/h con V_s .

- Cuando la recolección se efectúa mediante tuberías con perforaciones, se recomienda determinar la longitud de tubería mediante la ecuación 9, el distanciamiento máximo centro a centro mediante el criterio de la ecuación 10 y, para que la colección sea uniforme, el diámetro de los orificios y del tubo se determinarán a partir de la expresión 11.

$$V_c/V_o = nA_o/A_c \leq 0,15 \quad (11)$$

Donde:

n = número de orificios. Se calcula de acuerdo con la longitud del tubo, con un espaciamiento de 0,10 metros
 A_o = área de los orificios, normalmente 1/2"
 A_c = área del tubo
 V_o = velocidad en los orificios en m/s
 V_c = velocidad en la tubería en m/s

Esta relación de velocidades o de secciones asegura una desviación $\leq 5\%$ (véase el ábaco de la figura 4-23). Se recomienda, además, una altura de agua de 5 a 10 centímetros sobre los orificios.

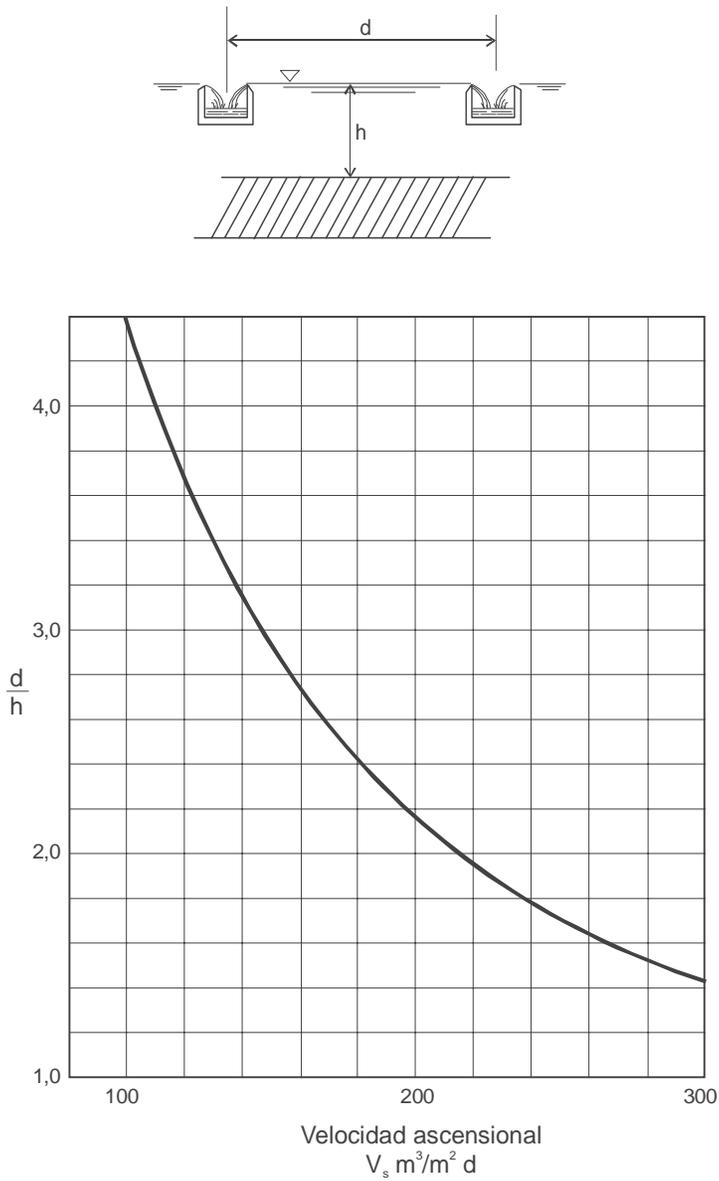


Figura 4-21. Relación de la distancia máxima entre las canaletas de agua decantada versus la profundidad de agua en función de la tasa de escurrimiento superficial (5)

Aplicación 1. Recolección del agua decantada mediante tuberías perforadas

Veamos ahora el procedimiento de cálculo del sistema de recolección de agua decantada. Se ha elegido un sistema de tuberías de PVC perforadas por su bajo costo y una tasa de 2 L/s x m debido a que en las pruebas de laboratorio se pudo ver que se forma un buen flóculo que precipita rápidamente. Véase el cuadro 4-8.

Aplicación 2. Recolección mediante vertederos

Para el caso de decantadores pequeños, la solución mas económica es la de colocar vertederos perimetrales. En ese caso, el cálculo es más sencillo y termina en el paso 2 del cuadro 4-8.

Después de calculada la longitud de los vertederos, debemos comprobar que el perímetro de la unidad sea igual o mayor que la longitud requerida. Si no cumple, colocaremos tres hileras de tuberías perforadas a lo largo de la unidad, que descarguen al canal de distribución a los filtros.

Tanto los vertederos como las tuberías se colocarán a una altura tal que la capa de agua sobre el módulo de placas sea de un metro. En la medida en que se reduce esta altura, se debe disminuir la tasa de recolección, para evitar que las líneas de flujo se arqueen y arrastren a los flóculos, para alcanzar el nivel de salida. La altura mínima entre el vertedero o tuberías y el módulo de placas es de 0,65 m.

7. ZONA DE LODOS

Esta zona está compuesta por las tolvas de almacenamiento y el sistema de evacuación o de descarga hidráulica de los lodos. La alternativa más recomendable, por su excelente funcionamiento, es la de tolvas separadas, con colector múltiple de extracción hidráulica y uniforme.

La otra solución que se desarrolla es la de tolvas continuas y extracción hidráulica de los lodos mediante sifones.

Cuadro 4-8. Dimensionamiento del sistema de recolección de agua decantada (4)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal de diseño	$Q = 100$	L/s	$L = Q/qr$ $L = 100 / 2$; $L = 50$	Longitud de tuberías de recolección	m
2	Tasa de recolección	$qr = 2$	L/s.m			
3	Ancho total del módulo de placas	$B = 2,40$	m	$N.º = L/b$; $N.º = 50/2,40$ $N.º = 20$ (10 en cada módulo de decantación)	Tubos de recolección	cm
4	Espaciamiento entre orificios	$e = 0,10$	m	$n = b/e$; $n = 2,40 / 0,10$; $n = 24$	Número de orificios por tubo	unidad
5	Diámetro de los orificios	$d_o = 1/2''$ $d_o = 0,0127$	pulgadas m	$A_o = d_o^2 \pi / 4$; $A_o = (0,0127)^2 \pi / 4$; $A_o = 0,0001$	Área de los orificios de $1/2''$	m ²
6	Relación para colección uniforme con una desviación < de 5%	$0,15$	unidad	$nA_o/A_c = 0,15$ $A_c = 24 (0,0001)/0,15$ $A_c = 0,016$	Diámetro de los tubos de recolección	m ²
7				$D = (4 A_c / \pi)^{0,5}$ $D = 0,143$; $D = 6''$	Diámetro del tubo	m

7.1 Tolvas separadas y colector múltiple

7.1.1 Criterios de diseño

- En las tolvas separadas, la separación entre orificios está dada por la configuración de las tolvas y el número de estas (figura 4-22).
- El volumen total de almacenamiento disponible en las tolvas está relacionado con la producción diaria de lodos. Normalmente se adopta un periodo de almacenamiento de un día y la frecuencia máxima de descargas en época de lluvia es de cuatro horas.
- Las mejores condiciones hidráulicas se consiguen “atolvando” los fondos, de modo que se tenga una tolva por cada boca de salida, con lo cual se consigue, además, tener orificios de descarga de mayor diámetro, lo que disminuye el riesgo de atoros. Como el lodo presiona el punto de salida, la tolva se vacía totalmente (figura 4-22). La viga ubicada debajo de las placas y las columnas se debe a que el módulo era de placas de asbesto-cemento.

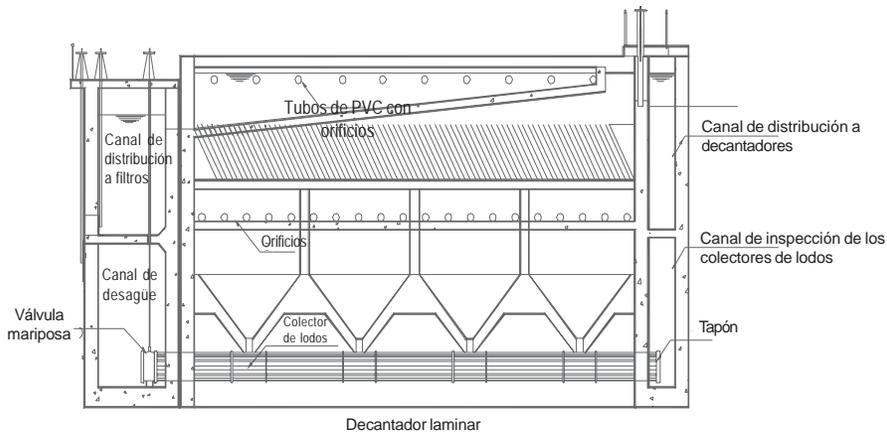


Figura 4-22. Tolvas separadas y colector múltiple (4)

- La pendiente de las tolvas debe estar entre 45° y 60° y la sección debe ser aproximadamente cuadrada.

- El diámetro del colector múltiple se incrementa en función de su longitud total, y el diámetro es modificado por el número de orificios de extracción.
- La extracción de lodos debe ser equitativa y se puede admitir una desviación máxima de 10%.
- La distribución del flujo entre los orificios depende de la relación entre la suma de las secciones de todos los orificios de descarga ($n A_o$) y la sección del dren (A). Experimentalmente, se encontró que, para que la desviación (δ) de flujo entre los orificios extremos no sea mayor de 10%, R debe variar entre 0,40 y 0,42. Véase el ábaco de la figura 4-23.

$$R \leq 0,42 \quad (12)$$

De acuerdo al ábaco de la figura 4-23, para que la desviación (δ) entre los orificios extremos del colector no sea mayor de 10%, se debe cumplir la siguiente relación:

$$\delta = \frac{n A L}{A} = \leq 0,50$$

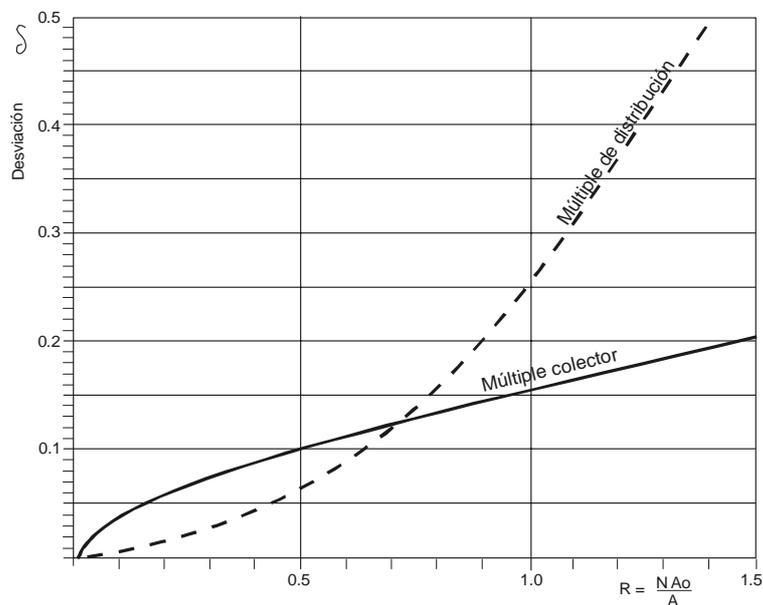


Figura 4-23. Canalizaciones con múltiples laterales (5)

- El diámetro de los orificios se determina en función del diámetro del dren (D), de la relación (R) y del número de orificios (n).

7.1.2 Criterios de dimensionamiento

- El diámetro de los orificios de descarga (d) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$d = x / 1,162 (H^{0,5} / V_a)^{0,5} \quad (13)$$

Donde:

- x = separación entre orificios de salida en m. Depende del número de tolvas y de sus dimensiones
- H = carga hidráulica en m
- V_a = velocidad de arrastre del lodo

Se recomienda establecer como velocidad mínima de arrastre en los puntos más alejados de 1 a 3 cm/s

- El diámetro del colector de lodos (D) se determina mediante la siguiente expresión:

$$D = d / \sqrt{R/N} \quad (14)$$

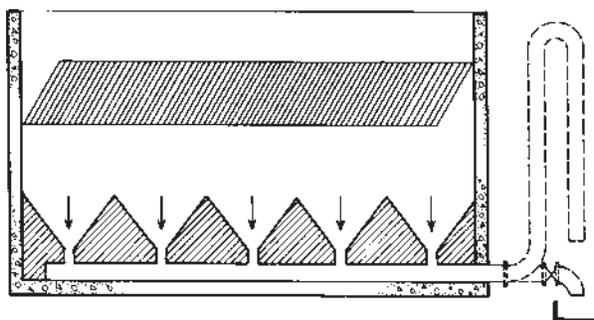


Figura 4-25. Colector múltiple con orificios y tolvas separadas (5)

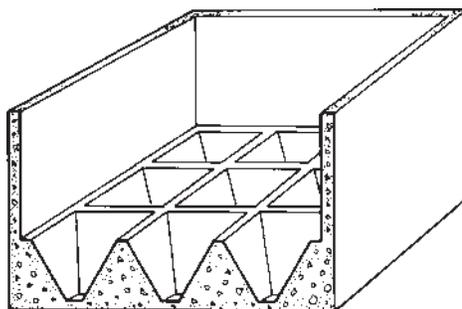


Figura 4-24. Sistema de tolvas separadas (8)

Donde:

- R = relación de velocidades entre el colector y los orificios de descarga
 N = número de orificios o de tolvas
 D = diámetro de los orificios en m

- El caudal de drenaje del colector (QL) se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$QL = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2gh} \quad (15)$$

Donde:

- C_d = coeficiente de descarga
 A = sección del colector en m^2
 g = aceleración de la gravedad en m/s^2
 H = carga hidráulica en m

7.1.3 Aplicación

Consideramos el diseño de un decantador de 100 L/s de capacidad del ejemplo anterior. El ancho total de estas unidades, teniendo en cuenta el ancho total del módulo de placas de 4,80 metros, el ancho del canal central de distribución de agua floculada de 0,65 metros (calculado en el cuadro 4-7), más los muros laterales de 0,15 metros, es de 5,75 metros. La unidad tiene 12 metros de largo, por lo que estamos considerando 3 tolvas de 1,50 metros de profundidad total.

En estas condiciones, los resultados del cálculo del cuadro 4-9 indican que la capacidad máxima de almacenamiento de las tolvas es de un día, el diámetro del colector y de la válvula mariposa de descarga de lodos es de 28" y los orificios de paso de las tolvas al colector, de 10". Las instrucciones de operación que acompañen al proyecto deben indicar claramente que en la época de lluvias la frecuencia máxima de descarga debe ser de 4 horas.

El esquema del decantador proyectado es similar al de la figura 4-22, solo que con tres tolvas y un solo colector para los dos módulos.

Cuadro 4-9. Dimensionamiento de un colector múltiple con tolvas separadas (4)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Longitud del decantador	$L = 12$	m	$x = L/N$	$x = 12/3$; $x = 4$	Longitud de la base mayor de cada tolva	m
2	Número de tolvas por decantador	$N = 3$	constante				
3	Ancho total del decantador	$B = 5,75$	m	$A = b \times I$	$A = 5,75 \times 4$ $A = 23$	Sección máxima de la tolva	m ²
4	Prof. de la sección recta de las tolvas	$hI = 0,50$	m	$V_{T1} = A \times hI \times N$	$V_{T1} = 23 \times 0,50 \times 3$ $V_{T1} = 34,5$	Volumen de la parte recta de la tolva	m ³
5	Profundidad del tronco de pirámide de la tolva	$h = 1$	m	$V_{T2} = [1/3 A h] N$	$V_{T2} = 1/3 (23) (1) (3)$ $V_{T2} = 23$	Volumen del tronco de pirámide de la tolva	m ³
6	Tasa de producción de lodos (dato que se obtiene en las pruebas de laboratorio)	$qL = 0,005$	L. L/s	$Q_L = qL \cdot Qd$	$QL = 0,005 (100) = 0,5$	Caudal de lodos producidos por la unidad en época de lluvias	
7	Caudal de lodos producido	$Q_L = 0,5$	L/s	$F = V_{T1}/q_L (86,4)$	$F = (V_{T1} + V_{T2})/0,5 (86,4)$ $F = 1,33$	Frecuencia de descarga	d
8	Velocidad de arrastre	$V_a = 1$	cm/s	$d = x / [1,162 (H^{0,5} N_a)^{0,5}]$	$d = 4/1,162 ((4,0)^{0,5}/0,01)^{0,5}$ $d = 0,243$; $d \approx 10''$	Diámetro de los orificios de descarga	m pulgadas
9	Carga hidráulica	$H = 4$	m				
10	Separación de orificios de descarga	$x = 4$	m				
11	Relación de velocidades para una desviación de 10%	$R = 0,42$		$D = d/(RN)^{0,5}$	$D = 0,25 / (0,42/3)^{0,5}$ $D = 0,71$ $D = 28''$	Diámetro del colector múltiple	m pulgadas

7.2 Canal central con sifones y tolvas continuas

7.2.1 Criterios de diseño

- En las tolvas continuas el cálculo del espaciamiento es un poco más sofisticado, pues se debe tener en cuenta la esfera de influencia alrededor del orificio, dentro del cual la velocidad del flujo que confluye al punto de salida es capaz de producir arrastre de partículas sedimentadas.
- El canal de descarga de lodos de la figura 4-26 debe dimensionarse de modo que el escurrimiento en su interior sea libre. En general, se requiere entrada y salida de aire, lo cual se consigue colocando una tubería de ventilación en los extremos. En estas condiciones, los colectores individuales dispuestos a lo largo del canal, descargarán libremente el lodo en el interior de este, pues todos estarán sometidos a la misma carga hidráulica (h).

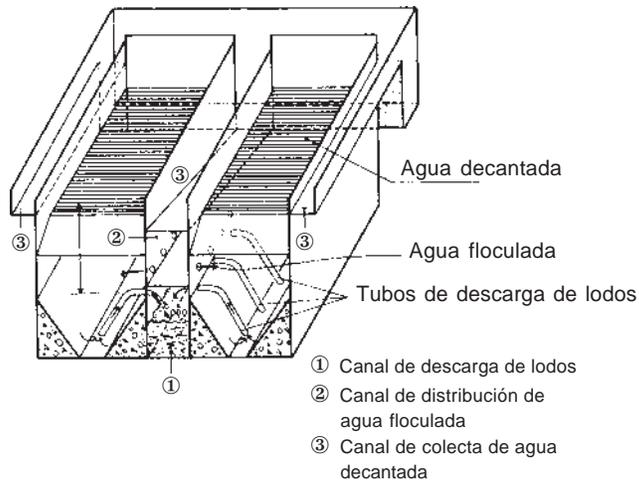


Figura 4-26. Canal de extracción de lodos mediante sifones (5)

7.2.2 Criterios de dimensionamiento

- El caudal en un tubo corto está dado por la siguiente expresión:

$$q = C_d \cdot A \sqrt{2gh} \quad (16)$$

El coeficiente de descarga (C_d) se selecciona del cuadro 4-10, en función de la relación L/D , donde L es la longitud del sifón y D su diámetro.

Cuadro 4-10. Valores de C_d en función de L/D

L/D	C_d
300	0,33
200	0,39
100	0,47
90	0,49
80	0,52
70	0,54
60	0,56
50	0,58
40	0,64
30	0,70
20	0,73

- En el caso de la figura 4-26, se tiene una sola tolva continua en el sentido longitudinal de la unidad, pero, como se puede apreciar en la figura 4-27, dependiendo del área de la unidad, se pueden tener varias tolvas continuas. La extracción de los lodos se puede hacer mediante sifones o por medio de orificios en el fondo.
- Es necesario considerar el número, diámetro y espaciamiento de los orificios de drenaje.
- La distancia (x) entre los orificios de descarga debe ser tal que la velocidad mínima de arrastre de los lodos (V_a) no sea menor de un cm/s.
- El canal debe funcionar con la superficie expuesta a la

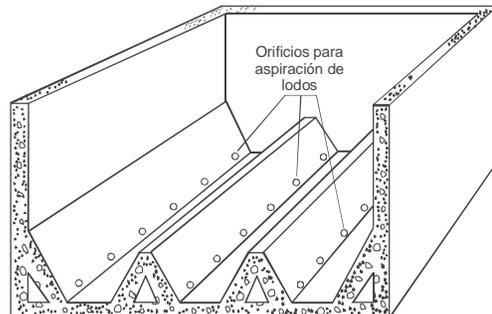


Figura 4-27. Sistema de tolvas continuas (8)

presión atmosférica, para que los sifones trabajen con descarga libre al canal y la recolección se realice equitativamente, al estar todos los pequeños sifones sometidos a la misma carga hidráulica (h) (figura 4-26).

- Distancia máxima entre tubos laterales de 0,90 m.
- Diámetro mínimo de los sifones laterales de 1 ½”.
- Caudal mínimo por lateral de 3 L/s.
- Velocidad mínima en el lateral de 3 m/s.
- Para mantener el régimen de descarga libre en el canal, se debe diseñar un ducto de entrada de aire con la sección adecuada, para que compense el volumen de aire arrastrado por el agua.

7.2.3 Aplicación

El cuadro 4-11 presenta un ejemplo de aplicación de estos criterios al dimensionamiento de este sistema de recolección de lodos mediante sifones cortos y tolva continua (figura 4-26).

De acuerdo con los cálculos del cuadro 4-11, será necesario instalar 22 sifones para tener una buena recolección de lodos. Las tolvas se llenarán en un día y medio en la época de lluvias y la válvula de descarga se abrirá durante 1,2 minutos para que las tolvas se vacíen; durante este lapso se deberá cerrar el ingreso de agua floculada para evitar cortocircuitos.

Debe instalarse, además, un tubo de ventilación a cada extremo del canal, para que haya circulación de aire en su interior.

7.3 Otros sistemas de descarga de lodos

7.3.1 Descarga mecánica automática

Se trata de válvulas automáticas que pueden ser accionadas mediante aire comprimido o agua, o bien por medio de un programador electrónico o electroválvula que abre y cierra el circuito para descargar según intervalos programados o mediante sifones de accionamiento mecánico y de carga automática (CLARIVAC). La figura 4-28 muestra un decantador laminar de un m³/s de capacidad operando con un sistema de extracción de lodos continuo de patente CLARIVAC.

Este sistema solo se recomienda para decantadores muy grandes y requiere buenos recursos de operación y mantenimiento.



Figura 4-28. Sistema CLARIVAC de extracción de lodos



Figura 4-29. Canal de descarga del sistema CLARIVAC

La figura 4-30 muestra el sifón fluctuante de diseño artesanal, y la figura 4-31, el sistema patentado CLARIVAC.

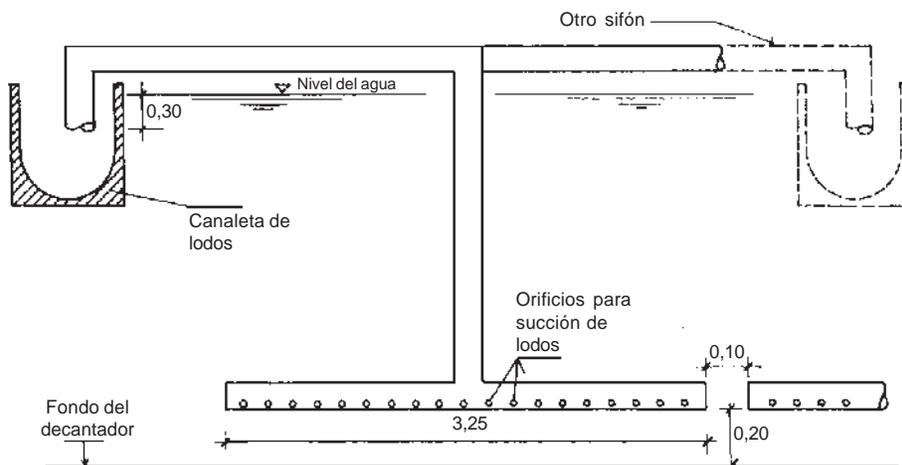


Figura 4-30. Sifón fluctuante

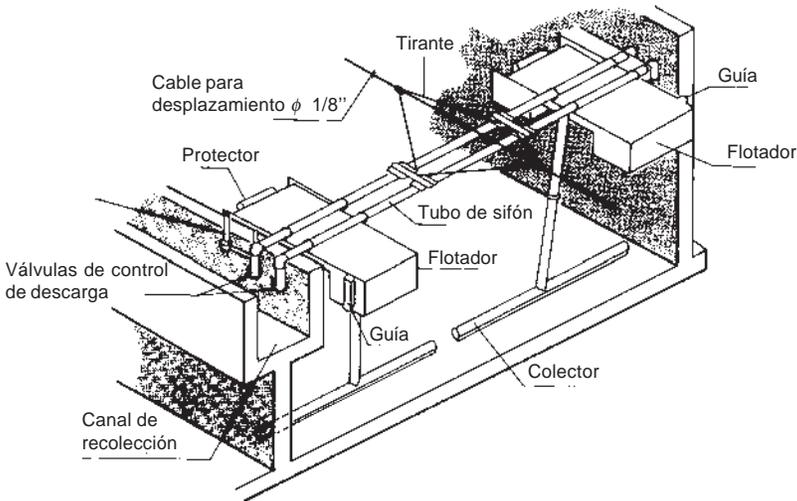


Figura 4-31. Sistema CLARIVAC

8. DEFECTOS DE DISEÑO MÁS COMUNES

Es todavía frecuente encontrar unidades nuevas diseñadas como las de la primera generación, sin una estructura de entrada apropiada y sin un sistema de extracción de lodos hidráulico (figura 4-32).

En estas unidades todo el flujo ingresa por el inicio de la unidad y se distribuye de acuerdo con la longitud de esta y la velocidad de paso por debajo de las placas. En las unidades largas normalmente la mayor parte del caudal llega al final y asciende levantando los flóculos.

También es frecuente encontrar que la longitud de recolección es muy corta y las pocas canaletas de recolección consideradas se encuentran totalmente ahogadas.

Cuando la longitud de recolección es muy corta, la velocidad de as-



Figura 4-32. Decantador de placas de la primera generación (4)

Cuadro 4-11. Cálculo del sistema de extracción de lodos mediante sifones

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Diámetro del sifón	$D = 38$	mm		$L = L_s/D$ $L = 2,84/0,038$ $L = 74,7$ del cuadro 4-10 se obtiene: $C_d = 0,53$	Coefficiente de descarga	constante
	Longitud del sifón	$L_s = 2,84$	m				
2	Carga hidráulica	$H = 3$	m	$q_L = C_d \cdot A \sqrt{2gh}$	$q_L = 0,53(0,0011) \sqrt{2(3)9,8}$ $q_L = 0,00447$ ó $4,7$	Caudal que puede extraer cada sifón	m^3/s o L/s
	Aceleración de la gravedad	$g = 9,8$	m/s^2				
3	Sección de un sifón de $\phi 1\frac{1}{2}$	$A = 0,0011$	m^2	$v = C_d (2gh)^{0,5}$	$v = 0,53 [2(9,8)(3)]^{0,5}$ $v = 4,06$	Velocidad de extracción	m/s
4	Tasa de producción de lodo	$T_L = 5$	mL/L	$Q_L = Q \times T_L$	$Q_L = 100(0,005)$ $Q_L = 0,5$	Caudal total de lodo producido	L/s
	Caudal de diseño	$Q = 100$	L/s				
5	Altura de tolva	$H_f = 2$	m	$V = [(b + b')/2] H_f N L$	$V = [(2,40 + 1,00)/2] 2$ $\times 10 \times 2$ $V = 68$	Volumen de almacenamiento de lodos	m^3
	Número de tolvas	$N = 2$	constante				
	Ancho mayor	$b = 2,40$	m				
	Longitud del decantador	$L = 10$	m				
6				$F = V/Q_L \times 86,4$	$F = 68 / [0,5(86,4)]$ $F = 1,6$	Máxima capacidad de almacenamiento disponible	d
7	Distancia entre sifones	$a = 0,90$	m	$N^i = 2La$	$N^i = 2(10)/0,90$ $N^i = 22$	Número de sifones	constante
8	Frecuencia de descarga ideal	$F_i = 4$	h	$V_i = Q_L \times F_i$	$V_i = 0,5 \times 4 \times 3,6$ $V_i = 7,2$	Volumen producido en 4 horas	m^3



Figura 4-33. Decantador de placas con problemas de recolección (4)

censión del agua es muy alta y arrastra a los flóculos que tratan de depositarse sobre las placas.

También son comunes los casos en que un decantador convencional se convierte en decantador de placas y el sistema de recolección permanece igual, sin incrementarse de acuerdo con el mayor caudal que la unidad va a producir en adelante.

El decantador de placas de la figura 4-34 no tiene un sistema de recolección adecuado. Únicamente se colocó un vertedero al final de la unidad, como si se tratara de un decantador convencional de flujo horizontal.



Figura 4-34. Decantador de placas sin sistema de recolección apropiado (4)



Figura 4-35. Sistema de recolección mal instalado (4)

En el caso del decantador de la figura 4-35, las tuberías de recolección están mal colocadas y fuera del agua, con lo que se desperdicia gran parte de su capacidad.

Otro defecto muy frecuente en este tipo de decantadores consiste en colocar el sistema de recolección muy próximo al módulo de placas, sin respetar la distancia recomendada de un metro ni la altura de agua mínima estipulada de 0,65 metros (figura 4-36). Al colocar la salida tan próxima al módulo de placas, las

líneas de flujo se arquean mucho para alcanzar la salida y arrastran a los flóculos, lo que empobrece la calidad del efluente del decantador.

En la figura 4-37 se puede apreciar el arrastre de flóculos a la superficie del decantador. En este caso, se sumaba el problema de que los decantadores habían sido proyectados con una tasa demasiado alta, consecuencia de no ha-



Figura 4-37. Arrastre de flóculos en la superficie de los módulos (4)

proyecto de este tipo; se observa que no hay una estructura de salida del decantador convencional y que el agua ingresa directamente por debajo del módulo de decantación sin una estructura de distribución uniforme. En estos casos, el decantador convencional es apenas un tanque de paso y la eficiencia es prácticamente nula.



Figura 4-36. Sistema de recolección sobre los módulos de decantación (4)

ber realizado un buen estudio de tratabilidad del agua antes de ejecutar el proyecto. Si estamos adivinando cuál es la tasa ideal para tratar una determinada agua, será difícil que demos en el clavo.

Otro defecto muy común es considerar un decantador convencional seguido de uno laminar sin estructuras de entrada y salida adecuadas. En la figura 4-38 se puede apreciar un



Figura 4-38. Decantadores convencional y laminar en serie (4)

En la figura 4-39 se puede observar otro caso similar: un decantador convencional sin estructuras de entrada y salida adecuadas, seguido de un decantador laminar sin estructura de entrada. Nuevamente, el agua pasa del decantador convencional directamente por debajo del módulo de placas.



Figura 4-39. Decantadores convencional y laminar en serie (4)

REFERENCIAS

- (1) Richter, Carlos. *Decantación*. Curitiba, SANEPAR, 1986.
- (2) Arboleda Valencia, Jorge. *Teoría y práctica de los sedimentadores de placas inclinadas*. Cali, ACODAL 89, 1979.
- (3) Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. *Optimización de la producción de plantas de tratamiento de agua mediante el Programa de Corrección Compuesto*. Lima, CEPIS/OPS, 1998.
- (4) Canepa de Vargas, L. Proyectos y fotos de archivo. Lima, CEPIS, 1990-2003.
- (5) Richter, Carlos. *Dispositivos de entrada y salida para decantadores*. Curitiba, SANEPAR, 1984.
- (6) Di Bernardo, L. *Metodos e Tecnicas de Tratamiento de Agua. Volume 1*. Rio de Janeiro, ABES, 1993.
- (7) Programa HPE/CEPIS/OPS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Manual V. Criterios de diseño*. Lima, CEPIS, 1992.
- (8) Arboleda Valencia, Jorge. *Teoría y práctica de los sedimentadores de alta rata. Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del Agua*. Cali, ACODAL-Seccional Valle del Cauca, 1987.
- (9) Arboleda, J. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Serie técnica 13. Lima, CEPIS/OPS, 1973.
- (10) Pérez Carrión, J. M. *Submódulo: Sedimentadores convencionales. Módulo 4.5.1*. Programa Regional OPS/HPE/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Lima, CEPIS /OPS, 1981.
- (11) Canepa de Vargas, L. M. *Submódulo: Sedimentación*. Lima, CEPIS/OPS, 1981.

-
- (12) Azevedo Netto, J. M. “Experiencia brasileña en el diseño de sedimentadores”. *Simposio sobre nuevos métodos de tratamiento de agua*. Asunción, 14-18 de agosto de 1972. Serie Técnica 14. Lima, CEPIS, 1975, pp. 90-129.
 - (13) Gomella, G. y H. Guerre. *Tratamiento de aguas para abastecimiento público*. Editores Técnicos Asociados, 1977.
 - (14) Hudson, M. E. “Sedimentation”. *AWWA Seminar on Upgrading Existing Water Treatment Plants*. Boston, 15-16 de junio, 1974. Denver, AWWA, 1974, pp. 67-78.
 - (15) Pérez Carrión, José. *Submódulo 4.5.2. Sedimentadores laminares*. Programa Regional OPS/HPE/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. Lima, CEPIS/OPS, 1981.
 - (16) Pérez Carrión, José. *Sedimentadores laminares*. Manual del Curso sobre Tecnología de Tratamiento de Agua para Países en Desarrollo. Lima, OPS/CEPIS/CIFCA, 1977.
 - (17) Hudson, Herbert. *Water Clarification Processes, Practical Design and Evaluation*. Nueva York, Van Nestrand Reinhold, 1981.
 - (18) Di Bernardo, Luiz. *Sedimentación convencional y laminar*. Ms.

