

Análisis de un floculador hidráulico de flujo horizontal⁽²⁶⁾

Luz Stella Bautista* y Jairo Alberto Romero Rojas**

En el diseño de floculadores hidráulicos de flujo horizontal para el tratamiento del agua se requiere determinar el número de Camp y el gradiente de velocidad, para lo cual se necesita conocer la pérdida de energía y el tiempo de retención en el tanque de floculación. El cálculo de las pérdidas de carga, a través de los canales formados por los tabiques del tanque, se realiza mediante ecuaciones de cálculo que difieren considerablemente en su magnitud. En este artículo se presenta la evaluación experimental de las pérdidas de energía en un floculador hidráulico de flujo horizontal y su correlación con las pérdidas calculadas a partir de las ecuaciones de diseño.

DESCRIPCIÓN

Un floculador hidráulico de flujo horizontal está conformado por un tanque, generalmente en concreto, con pendiente longitudinal; dentro de él, hay un conjunto de tabiques o bafles transversales fijos o removibles en concreto, asbesto-cemento, madera u otro material liviano, adheridos o fijados al fondo del tanque y a uno de los muros laterales, en tal forma que se crea entre ellos, alternando entre uno y otro tabiques a un lado y al otro, canales con flujo en zigzag (figuras 1 y 2).

El cálculo de las pérdidas de carga, a través de los canales formados por los tabiques del tanque, se realiza mediante ecuaciones de cálculo que difieren considerablemente en su magnitud.

El ensayo de tratabilidad del agua, mediante el ensayo de jarras, realizado en cierto tipo de equipo (figura 3), permite determinar las condiciones de operación del floculador y se utiliza para optimizar la coagulación y evaluar diferentes parámetros de diseño del proceso de coagulación-floculación-sedimentación, como el gradiente de velocidad, el tiempo de retención y el número de Camp. Detalles del ensayo se pueden consultar en la referencia 3 y en la Norma Técnica Colombiana NTC 3903.

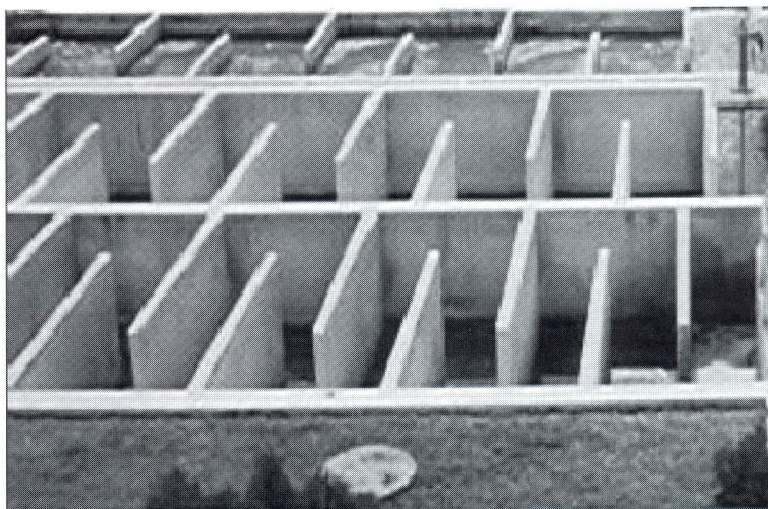


Figura 1. Floculador hidráulico de flujo horizontal con tabiques en concreto⁽¹⁾.

* Ingeniera civil, especialista en recursos hidráulicos y medio ambiente.

** Ingeniero civil, MEEE, profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

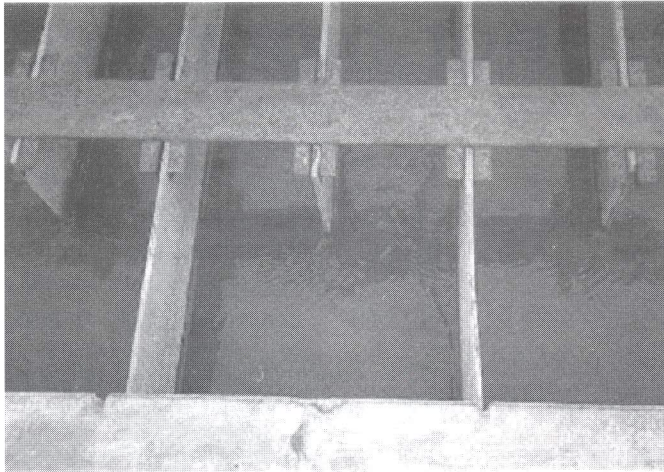


Figura 2. Floculador hidráulico de flujo horizontal con tabiques en asbesto-cemento ⁽²⁾.

PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN FLOCULADOR HIDRÁULICO

Desde 1917, Von Smoluchowski demostró que la floculación ortocinética está representada por la ecuación 1. Camp y Stein consideran que la relación básica para el proceso de floculación está dada por la ecuación 2.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{G}{6} n_1 n_2 (d_1 + d_2)^3 \quad (1)$$

$$N = \frac{G n_1 n_2 (d_1 + d_2)^3}{6} \quad (2)$$

Donde:

dN/dt = variación del número de colisiones entre las partículas 1 y 2 con respecto al tiempo.

N = número de colisiones.

G = gradiente de velocidad promedio.

n_1 y n_2 = número de partículas de diámetro d_1 y d_2 , respectivamente.

d_1 y d_2 = diámetro de las partículas 1 y 2, respectivamente.

Camp y Stein, en 1943, expresaron el gradiente de velocidad promedio según la ecuación 3.

$$G = \left[\frac{P}{\mu V} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Donde:

G = gradiente de velocidad promedio, s^{-1}

P = potencia inducida al fluido, W

μ = viscosidad dinámica del fluido, $N \cdot s/m^2$, $kg/m \cdot s$

V = volumen útil, m^3

El gradiente de velocidad describe la intensidad de la mezcla y la ecuación 3 ha sido la más usada para evaluar el valor de G en un sistema de floculación (4). En floculadores hidráulicos, el cálculo del gradiente de velocidad se hace teniendo en cuenta la pérdida de carga total en el tanque, expresando la potencia en términos del caudal, como se indica en las ecuaciones 4 a 7.

$$P = \gamma Q h \quad (4)$$

$$P = \frac{\gamma V h}{t} \quad (5)$$

$$\frac{P}{V} = \frac{\gamma h}{t} = \frac{\rho g h}{t} \quad (6)$$

$$G = \left[\frac{\rho g h}{\mu t} \right]^{1/2} = \left[\frac{g h}{\nu t} \right]^{1/2} = \sqrt{\frac{\gamma h}{\mu t}} \quad (7)$$

Donde:

γ = peso específico del fluido, N/m^3

Q = caudal, m^3/s

h = pérdida de carga, m

t = período de mezcla, s

G = gradiente de velocidad, s^{-1}

ρ = densidad del fluido, kg/m^3

g = aceleración de la gravedad, m/s^2

μ = viscosidad dinámica del fluido, $N \cdot s/m^2$, $kg/m \cdot s$

V = volumen, m^3

ν = viscosidad cinemática del fluido, m^2/s

La floculación está controlada por el gradiente de velocidad o intensidad de la mezcla, así como por el período de mezcla lenta; las normas de diseño tienen en cuenta que un gradiente de velocidad alto puede romper el floc y que un

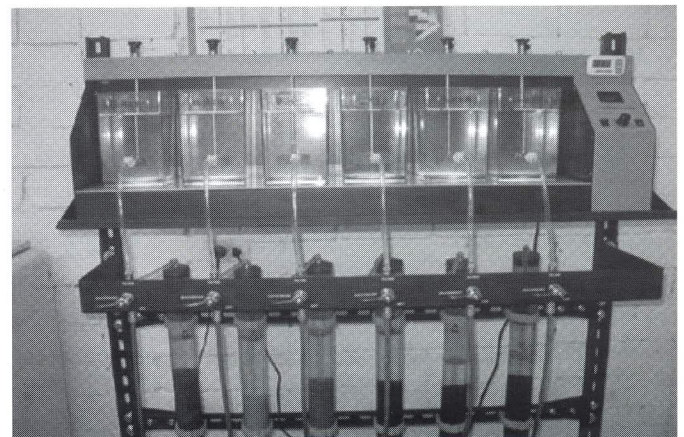


Figura 3. Equipo de jarras del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

gradiente de velocidad bajo puede no producir suficiente agitación para generar bastante número de contactos y compactación óptima del floc. Los principales criterios para el diseño de floculadores hidráulicos se presentan en la tabla 1.

En general, el valor de G recomendado es de 5 a 100 s^{-1} ; el número de Camp, Gt , o producto del gradiente de velocidad por el período de retención de 10.000 a 150.000, y el período de floculación entre 10 y 90 minutos.

El cálculo de la pérdida de carga corresponde a un problema netamente hidráulico, que depende sobre todo de las características geométricas de los canales, del tipo de material de los baffles y de las características de la curva de 180° en el cambio de dirección de un canal a otro.

La pérdida de carga en el floculador hidráulico de flujo horizontal se presenta de manera distinta en dos zonas del floculador: una en los tramos rectos y otra en los giros de 180°. Diferentes autores han propuesto expresiones que determinan estos valores, pero todos coinciden en que la pérdida de carga en las curvas corresponde al producto de un factor por la altura de velocidad del flujo en el canal, como se indica en la ecuación 8.

$$h_v = K \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

Tabla 1

Parámetros de diseño de floculadores hidráulicos

G, s^{-1}	t, min	Número de Camp, Gt	Referencia
20 a 70	-	-	5
5 a 100	10 a 60	20.000 a 150.000	6
30 a 60	-	10.000 a 100.000	7
10 a 100	15 a 20	-	8
20 a 100	10 a 60	20.000 a 150.000	9
20 a 70	10 a 30	-	10
15 a 60	-	10.000 a 150.000	11
30 a 60	10 a 90	10.000 a 100.000	12
25 a 65	20 a 30	-	13
-	15 a 60	-	14
-	20 a 50	-	15
-	10 a 90	-	16
-	20 a 45	-	17
5 a 100	10 a 90	10.000 a 150.000	Resumen
20 a 70	10 a 60	10.000 a 150.000	Valor típico

Donde h_v es la pérdida en cada vuelta de 180° expresada en metros, g es la aceleración de la gravedad en m/s^2 , V es la velocidad de flujo en m/s y K es un valor empírico que tiene en cuenta la turbulencia y la fricción en la curva.

La ecuación anterior tiene diferentes versiones, según distintos autores.

• Según Sánchez⁽¹⁷⁾:

$$h_v = K \frac{V^2}{2g}, \quad \text{con } K = 0,124 + 3,104 \left(\frac{p}{a} \right)^{3.5} \quad (9)$$

Donde:

- h_v = pérdida de carga en cada vuelta, m
- V = velocidad media en el canal, m/s
- g = aceleración de la gravedad, m/s^2
- K = coeficiente que depende de la relación entre el ancho del canal y el ancho de la vuelta
- p = separación entre tabiques, m
- a = ancho de la vuelta, m

• Según Babbitt y Donald⁽¹⁸⁾:

$$h_v = 3,22 \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

Donde:

- h_v = pérdida de carga en cada vuelta, m
- V = velocidad promedio de flujo en el canal, m/s
- g = aceleración de la gravedad, m/s^2

• Según Bhargava y Ojha⁽¹⁹⁾, menor valor del intervalo adoptado por estos autores:

$$h_v = 1,5 \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

Donde:

- h_v = pérdida de carga en cada vuelta, m
- V = velocidad promedio de flujo en el canal, m/s
- g = aceleración de la gravedad, m/s^2

• Según Bhargava y Ojha⁽¹⁹⁾, mayor valor del intervalo adoptado por estos autores:

$$h_v = 2 \frac{V^2}{2g} \quad (12)$$

Donde:

- h_v = pérdida de carga en cada vuelta, m
- V = velocidad promedio de flujo en el canal, m/s
- g = aceleración de la gravedad en m/s^2

El cálculo de la pérdida de energía en los tramos rectos se hace mediante las ecuaciones convencionales para pérdidas por fricción en canales con flujo laminar:

- Ecuación de Manning o Strickler:

$$h_f = \frac{V^2 n^2 L}{R^{4/3}} \tag{13}$$

Donde:

- V = velocidad media en el tramo recto, m/s
- n = coeficiente de rugosidad de Manning, según tabla 2
- R = radio hidráulico, m
- L = longitud de canal, m

La ecuación de Manning es la más utilizada en el cálculo de flujo uniforme en canales abiertos. Los valores de n dependen de la rugosidad del canal, la cual cambia con la edad y con la condición del canal. Los valores de rugosidad tabulados hasta el momento son aplicables en flujo turbulento completamente desarrollado⁽²⁰⁾.

- Ecuación de Hazen - Williams:

$$h_f = \left[\frac{V}{0,85CR^{0,63}} \right]^{1,85} L \tag{14}$$

Donde:

- h_f = pérdida por fricción, m
- V = velocidad media de flujo en el tramo recto, m/s
- C = coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, según tabla 3
- R = radio hidráulico, m
- L = longitud de canal, m

METODOLOGÍA

Aforo

Para el aforo fue necesario diseñar un elemento de fácil instalación, flexibilidad en su manejo y confiabilidad en sus lecturas. Se optó por la instalación de un vertedero rectangular de pared delgada colocado en el canal de entrada de agua cruda. El vertedero fue calibrado en el sitio de instalación y diseñado de acuerdo con las normas británicas para vertederos en canales abiertos⁽²⁵⁾.

La ecuación utilizada es la ecuación 15.

$$Q = C \frac{2}{3} \sqrt{2g} * b * h^{3/2} \tag{15}$$

Donde:

- Q = caudal, m³/s.
- C = coeficiente de descarga (adimensional)

- g = aceleración de la gravedad, m/s²
- b = ancho efectivo del vertedero, m
- h = cabeza efectiva de la lámina de agua, m

El ancho efectivo del vertedero rectangular construido en acrílico biselado es de 0,25 m. Los resultados de la calibración del vertedero se muestran en la figura 3.

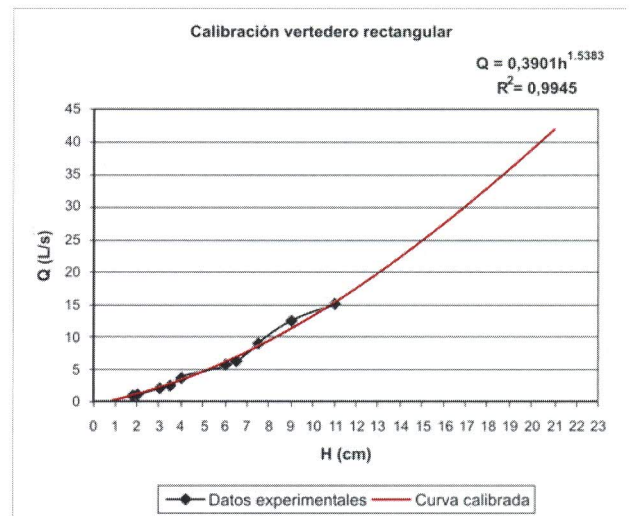


Figura 3. Curva de calibración del vertedero instalado.

Nivelación y medida de pérdidas

La nivelación del fondo de los canales se realizó con un nivel digital, de precisión igual a 1 mm y mira convencional de precisión de 1 cm, tomando como referencia un punto arbitrario fijo en la planta, adoptando dos ejes principales de medición (figura 4). Para la medición de las profundidades de lámina de agua se hizo una limpieza del floculador



Figura 4. Nivelación del floculador.

con el fin de garantizar que el fondo de los canales estuviera libre de sedimentos; la medición de las profundidades se leyó en los mismos puntos donde se hizo la nivelación, para cinco caudales diferentes (figura 5).

La velocidad en cada uno de los puntos de los ejes adoptados, para los diferentes caudales, se determina de acuerdo con la ecuación de continuidad.

$$V = \frac{Q}{A * 1000} \quad (16)$$

Donde:

V = velocidad de flujo, m/s

Q = caudal, L/s

A = área mojada, m²

Para el cálculo de la energía se tiene en cuenta la altura de la lámina de agua y las energías de velocidad determinadas en terreno. Para el cálculo del coeficiente de pérdida de energía en las curvas del floculador se utiliza la ecuación 17.

$$h_v = K \frac{V^2}{2g} \quad (17)$$

Donde:

h_v = pérdida en cada curva, m

V = velocidad de flujo en el canal, m/s

g = aceleración de la gravedad, m/s²

K = constante adimensional

Tabla 2

Coeficiente de rugosidad de Manning para canales en concreto⁽²¹⁾

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Promedio	Máximo
B. Canales prefabricados o construidos			
1. Concreto			
a) Troquelado	0,011	0,013	0,015
b) Sobrepuesto	0,013	0,015	0,016
c) Alistado con fondo de grava	0,015	0,017	0,020
d) Sin alistar	0,014	0,017	0,020
e) Sección uniforme	0,016	0,019	0,023
f) Sección irregular	0,018	0,022	0,025
g) Excavado sobre roca uniforme	0,017	0,020	-
h) Excavado sobre roca irregular	0,022	0,027	-
2. Fondo de concreto alistado con lados de:			
a) Piedra revestida en mortero	0,015	0,017	0,020
b) Piedra incrustada en mortero	0,017	0,020	0,024
c) Pañete de cemento alistado	0,016	0,020	0,024
d) Pañete de cemento sin alistar	0,020	0,025	0,030
e) Escombros sobre riprap	0,020	0,030	0,035
3. Fondo de grava con lados de:			
a) Concreto formateado	0,017	0,020	0,025
b) Piedra incrustada en mortero	0,020	0,023	0,026
c) Escombros o riprap	0,023	0,033	0,036
4. Ladrillo o bloque			
a) Barnizado	0,011	0,013	0,015
b) En mortero	0,012	0,015	0,018
5. Metal			
a) Acero con superficie lisa	0,011	0,012	0,014
b) Metal corrugado	0,021	0,025	0,030
6. Asfalto			
a) Liso	0,013	0,013	-
b) Rugoso	0,016	0,016	-
7. Cubierta vegetal	0,030	-	0,500

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Pérdidas por fricción

En la tabla 4 se presentan las pérdidas promedio por fricción obtenidas para cada uno de los caudales analizados. En dicha tabla se observa que a medida que aumenta el caudal en el floculador desde 1,4 L/s hasta 18,1 L/s, las pérdidas por fricción en los canales también aumentan; pero para caudales superiores a 18,1 L/s, hasta 25,4 L/s, las pérdidas por fricción permanecen constantes. Los valores de pérdida por fricción medida en cada uno de los canales del floculador varían ampliamente, con desviaciones estándar de 4 a 6 mm. Esta amplia variación puede ser el resultado de la existencia de canales con poca uniformidad en sus condiciones geométricas y en su pendiente longitudinal, lo cual produce diferentes condiciones de flujo. Otra causa de la variación de los resultados de pérdida puede obedecer al remanso producido en los canales debido a las contrapendientes longitudinales de algunos de ellos.

En la tabla 5 se presentan los valores de los coeficientes de pérdida para las ecuaciones de Manning y Hazen-Williams, con base en la pérdida experimental promedio (tabla 4) y adoptando para el cálculo del coeficiente un área constante igual al área promedio para cada caudal observado.

Tabla 3

Coefficientes de rugosidad típicos de Hazen - Williams^(22,23,24)

Material de la tubería	C	n*
Acero remachado (nuevo)	110	0,012
Acero remachado (usado)	85	0,015
Acero soldado (nuevo)	130	0,010
Acero soldado (usado)	90	0,014
Hierro fundido (nuevo)	130	0,010
Hierro fundido (usado)	100	0,013
Hierro fundido (nuevo)	90	0,014
Concreto (buena terminación)	130	0,010
Concreto (terminación común)	120	0,011
Asbesto - cemento	140	0,009
Plástico (PVC)	150	0,008
Acero ondulado (chapa ondulada)	60	0,021
Canal en concreto con paredes en riprap o en concreto ciclópeo	40	0,031

* Correspondencia aproximada de n de Manning con C de Hazen - Williams.

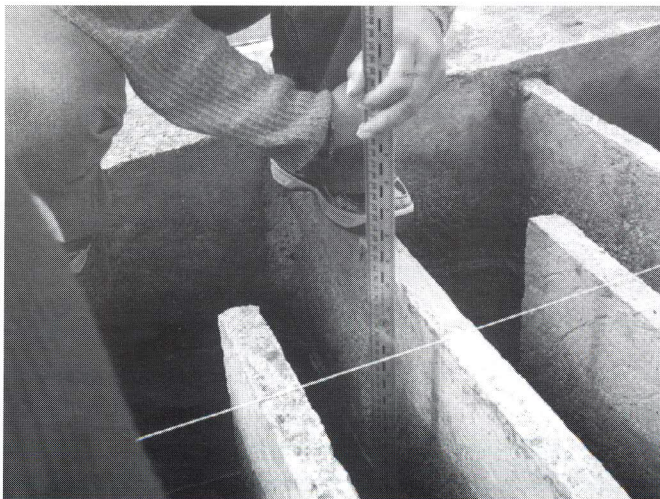


Figura 5. Medición de profundidad de lámina de agua.

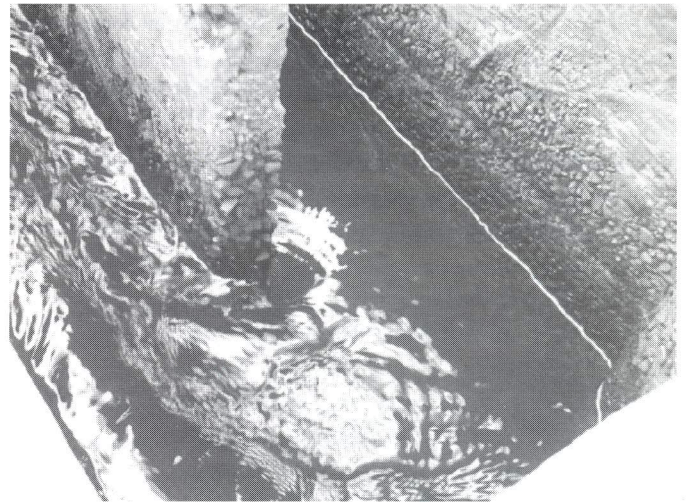


Figura 6. Detalle de las características de las curvas del floculador.

El coeficiente de rugosidad de Manning encontrado, $n = 0,031$ a $0,035$; $0,032$ en promedio, es comparable con el valor para un canal en concreto, prefabricado o construido *in situ*, con fondo de grava y lados de escombros o riprap, cuyo valor es $0,033$ (tabla 2). Este valor es muy representativo de las condiciones del floculador (figura 6), el cual presenta superficies laterales y fondo con grava a la vista.

El coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams observado varía entre 38 y 43; en promedio 41, indicativo de canales de alta rugosidad como los existentes en el prototipo y comparable con el valor de la tabla 3 para canal en concreto con paredes en riprap o en concreto ciclópeo.

PÉRDIDAS EN CURVAS

En la tabla 6 se presentan las pérdidas promedio en las curvas, para cada uno de los caudales analizados.

Tabla 4
Pérdidas por fricción en los canales

Caudal, L/s		1,4	6,0	18,1	22,9	25,4
Intervalo	mm	1 a 17	1 a 19	0 a 23	4 a 22	3 a 22
Promedio aritmético	mm	9	11	13	13	13
Desviación estándar	mm	4	5	6	5	5

Tabla 5
Coeficientes de pérdida por fricción en el floculador

Caudal (L/s)	Pérdida (mm)	V (m/s)	A (m ²)	Y (m)	P (m)	R (m)	Manning	Hazen-Williams
1,4	9	0,19	0,014	0,096	0,342	0,042	0,035	38
6,0	11	0,27	0,024	0,163	0,476	0,051	0,031	43
18,1	13	0,31	0,059	0,391	0,932	0,063	0,034	39
22,9	13	0,34	0,069	0,459	1,067	0,064	0,032	41
25,4	13	0,36	0,071	0,473	1,096	0,065	0,031	43
Promedio							0,032	41
Desviación estándar							0,002	2

Tabla 6
Pérdidas promedio en curvas

Caudal	L/s	1,4	6,0	18,1	22,9	25,4
Intervalo	mm	1 a 32	0 a 33	0 a 26	0 a 37	0 a 32
Promedio aritmético	mm	12	11	11	12	11
Desviación estándar	mm	9	8	7	8	7

De la tabla 6 se deduce que las pérdidas en cada curva oscilan entre 11 y 12 mm, manteniéndose relativamente constantes para todos los caudales observados. Los intervalos de pérdida medida en cada una de las curvas del floculador presentan rangos muy amplios de variación con desviación estándar de 7 a 9 mm, valores indicativos de las diferentes condiciones de rugosidad en las curvas del floculador. También se puede considerar como causa de la amplia variación de los resultados de pérdida en las curvas el remanso producido en los canales debi-

do a las contrapendientes longitudinales de algunos de ellos.

En la tabla 7 se muestran los valores experimentales del coeficiente de pérdida de energía en las curvas.

En la tabla 8 se presentan los valores del coeficiente de pérdida en curvas, K , calculados con las ecuaciones convencionales de diseño.

Los valores experimentales de K (tabla 7) oscilan entre 1,9 y 3,5; comparables con los coeficientes propuestos por Babbitt y Donald, y Bhargava y Ojha. Sin embargo, el valor calculado por la ecuación de Sánchez no es com-

Tabla 7
Coeficientes de pérdida promedio en curvas

Caudal (L/s)	Pérdida (mm)	V (m/s)	K experimental
1,4	12	0,26	1,9
6,0	11	0,27	2,0
18,1	11	0,33	3,0
22,9	12	0,34	3,3
25,4	11	0,35	3,5
Promedio			2,4

Tabla 8
Coeficientes de cálculo de pérdidas en curvas

Autor	K
Sánchez (ecuación 9)	0,55
Babbitt y Donald	3,22
Bhargava y Ojha (menor valor)	1,5
Bhargava y Ojha (mayor valor)	2

parable con el valor experimental. El valor promedio experimental de K igual a 2,4; es inferior al valor recomendado por Babbitt y Donald, pero superior al sugerido por Bhargava y Ojha.

Los valores experimentales del coeficiente de pérdida en curvas aumentan a medida que se incrementa el caudal, debido tal vez a que el valor de K no es estrictamente constante como se supone en el cálculo convencional de pérdidas en curvas.

Gradiente de velocidad y número de Camp

En la tabla 9 se presentan los valores experimentales del gradiente de velocidad y del número de Camp, para una temperatura de 20 °C, peso específico del agua igual a 9.792 N/m³, viscosidad dinámica de 1,005 × 10⁻³ N s/m² y longitud total de canales de 265,65 m.

Los resultados de la tabla 9 indican lo siguiente:

- El tiempo de floculación oscila entre 12 y 23 minutos.
- El gradiente de velocidad varía entre 70 y 126 s⁻¹.
- El número de Camp fluctúa entre 84.000 y 97.000.

Para caudales mayores de 6 L/s, el tiempo de floculación es relativamente corto (preferible > 20 minutos), aunque se encuentra dentro de los rangos típicos citados en la literatura (tabla 1). De la misma manera, para caudales mayores de 18 L/s el gradiente de velocidad excede el valor máximo típico de 100 s⁻¹ (tabla 1).

El prototipo se diseñó para tratar 20 L/s con un período de retención de 20 minutos. Se puede observar que el gradiente de velocidad, en las condiciones actuales, para el caudal de diseño es mayor que los valores recomendados; además, puede conducir a esfuerzos cortantes excesivos sobre el floc y a una coagulación y sedimentación deficientes.

Tabla 9
Gradiente de velocidad y número de Camp

Caudal (L/s)	Pérdida total (m)	V (m/s)	t (min)	G (s ⁻¹)	Gt
1,4	0,688	0,19	23	70	96.600
6,0	0,766	0,27	16	88	84.480
18,1	1,059	0,31	14	111	93.240
22,9	1,157	0,34	13	120	93.600
25,4	1,166	0,36	12	126	90.720
Promedio			16	103	91.728

CONCLUSIONES

- La realización de un trabajo experimental sobre prototipos en servicio tiene muchos inconvenientes debido a la restricción en el manejo de caudales impuesto por la operación necesaria de la planta para satisfacer el consumo de la población.

- El floculador hidráulico evaluado no ha recibido el mantenimiento adecuado en 32 años de funcionamiento, no trabaja en condiciones estrictas de flujo uniforme y requiere conservación del concreto en los canales y en las curvas, al igual que eliminación de las contrapendientes y de los niveles de control inapropiados que producen remanso en el flujo del agua.

- De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos para los coeficientes de pérdidas por fricción, la ecuación que cumple mejor con dichos valores es la ecuación de Manning. El valor promedio observado de dicho coeficiente es de 0,032, el cual corresponde a canales con fondo de grava y lados de escombros o riprap.

- Para diseño de floculadores hidráulicos de flujo horizontal, es recomendable utilizar para el cálculo de pérdidas por fricción la ecuación de Manning, con un coeficiente de rugosidad adecuado de acuerdo con el tipo de material con el que se pretende construir el floculador.

- Para el cálculo de pérdidas en curvas, en función de la altura de veloci-

dad, el valor promedio observado de K fue de 2,4.

- Para diseño de floculadores hidráulicos de flujo horizontal es razonable sugerir, para pérdidas en curvas, un valor de K igual a 2, semejante al propuesto por Bhargava y Ojha, siempre y cuando se construya el floculador con acabados adecuados.

- El gradiente de velocidad observado oscila entre 70 y 126 s⁻¹, con un valor promedio de 103 s⁻¹ para caudales de 1,4 a 25,4 L/s.

- Es recomendable establecer un programa de mantenimiento preventivo y correctivo de las condiciones físicas y operativas del floculador. De esta manera se pueden disminuir las pérdidas, con el consecuente mejoramiento del gradiente de velocidad y, por tanto, de una mejor floculación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Douglas Aguilar, Félix (2003). Seminario internacional "Mejoramiento de calidad de agua para consumo humano". Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. 24 de agosto.
2. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Cepis)/OPS, <http://www.cepis.opsoms.org/eswww/fulltext/tratagua/rapida/rapida1.html>.
3. RAS 2000. C.2.5.1.1 y C.2.5.1.2. Ministerio de Desarrollo Económico, Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000.
4. Romero Rojas, Jairo Alberto (2000). *Purificación del agua*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
5. RAS 2000. A.2.5.1.1. Ministerio de Desarrollo Económico, Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000.

6. American Water Works Association (Asce, AWWA) (1998). *Water Treatment Plant Design*. AWWA, 806 pp.

7. Barghava, D.S. & Ojha, C.S.P. (1993). *Models for Design of Flocculating Baffled Channels*. *Wat. Res.*, Vol. 27, No. 3, pp. 465-475.

8. Arboleda, V.J. (1992). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Acodal.

9. Smethurst, G. (1979). *Basic Water Treatment*. Thomas Telford Ltda.

10. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Cepis)/OPS. <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/tratagua/rapida/rapida1.html>.

11. Qasim, Syed, R., Mothey, Eduard, M. & Zhu, Guang (2000). *Water Works Engineering, Planning, Design and Operation*.

12. Clark, J.W., Viessman, W. & Hammer, M.J. (1971). *Water Supply and Pollution Control*. Int. Textbook Co.

13. Steel, E.W. & McGhee, T.J. (1979). *Water Supply and Sewerage*, 5ª ed. McGraw Hill Book Co.

14. Instituto de Fomento Municipal (Insfopal). *Especificaciones para diseño de plantas potabilizadoras de agua*.

15. Hardenbergh, W.A. & Rodie, E.R. (1961). *Water Supply and Waste Disposal*. International Textbook Co.

16. Fair, G.M. & Geyer, J.C. (1954). *Water Supply and Waste Disposal*. Wiley.

17. Sánchez, M.H. (1970). *Ingeniería de acueductos y tratamiento de aguas*. U.N.

18. Babbitt, H.E., Donald, J.J. & Cleasby, J.L. (1962). *Water Supply Engineering*. McGraw Hill.

19. Barghava, D.S & Ojha, C.S.P. (1993). *Models for Design of Flocculating Baffled Channels*. *Wat. Res.*, Vol. 27, No. 3, pp 465-475.

20. Rodríguez Díaz, Héctor Alfonso (2001). *Hidráulica experimental*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

21. Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers (2004). *HEC-RAS River Analysis System Version 3.1.2*. Mannings in Information Table. April.

22. López Cualla, Ricardo Alfredo (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

23. Azevedo Netto J.M. & Acosta Álvarez, G. (1976). *Manual de hidráulica*. Harla.

24. Jonson, H.E. & Froehlich, D.C. (1988). *Basic Hydraulic Principles of Open Channel Flow*. WRP, USGS.

25. BSI. British Standard (1981). *Measurement of Liquid Flow in Open Channels*. BS 3680. Part 4A.

26. Bautista Tibaquirá, Luz Stella (2006). Análisis experimental de un floculador hidráulico de flujo horizontal. Trabajo de grado, Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Escuela Colombiana de Ingeniería